



НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына и кафедра общей ядерной
физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПАХ ЭРБИЯ, ДИСПРОЗИЯ, ПАЛЛАДИЯ И МОЛИБДЕНА

(по материалам кандидатской диссертации)

Докладчик: Н.Ю. Фурсова

Актуальность и степень разработанности

- Отсутствие экспериментальных данных о фотопротонных реакциях для большинства тяжёлых ядер (диспрозий, эрбий). Отсутствие теоретических подходов, хорошо описывающих как фотонейтронные, так и фотопротонные сечения на всех стабильных ядрах одного изотопного ряда.
- Планирование и разработка первых гамма-активационных экспериментов на источнике комптоновского рассеяния (ИКИ НЦФМ, г. Саров, Россия).
- Фотоядерные реакции как альтернативный метод наработки медицинских изотопов. Для оценки наработки радионуклидов фотоядерным методом необходимо знать выходы всех основных фотоядерных реакций, происходящих на стабильных изотопах химического элемента.
- Фотоядерные реакции как один из сценариев образования обойдённых ядер во Вселенной в процессе нуклеосинтеза.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является получение новых экспериментальных данных о выходах и сечениях фотоядерных реакций ((γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, p) и др.) на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- Подготовка и проведение экспериментов по облучению мишеней природного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.
- Измерение и анализ спектров активности, наведенной в образцах из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Расчет тормозного спектра и эффективности детектора из сверхчистого германия с помощью GEANT4.
- Определение экспериментальных выходов фотонейтронных и фотопротонных реакций на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.
- Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчетов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS со стандартными параметрами.
- Анализ и установление закономерностей в поведении выходов фотоядерных реакций в зависимости от роста числа нейтронов в пределах одного изотопа и при переходе к другим изотопам.

Объектом исследования были фотоядерные реакции на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. **Предметом исследования** являлись выходы и сечения на эквивалентный квант для реакций с вылетом протонов и нейтронов на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.

Методология и методы исследования

- Гамма-активационный метод проведения эксперимента, лишенный недостатков прямой регистрации нуклонов, вылетевших в результате фотоядерных реакций.
- Применение достаточно тонких тормозных вольфрамовых конверторов, позволяющее использовать в качестве основы для расчета тормозных спектров сечения образования тормозных гамма-квантов Зельтцера-Бергера.
- Способ последовательного измерения и записи спектров, позволяющий получить зависимости интенсивности распадов от времени, а затем рассчитать по кривым распада периоды полураспада изотопов.
- Идентификация радиоактивных изотопов, получаемых в ходе фотоядерных реакций на стабильных изотопах диспрозия, эрбия, палладия и молибдена, методом гамма-спектрометрии с использованием детектора из сверхчистого германия.
- Методика расчета эффективности детектора из сверхчистого германия, учитывающая геометрию детектора, положение мишени относительно детектора и эффект самопоглощения гамма-квантов в самой мишени с помощью пакета GEANT4.
- Способ расчета выходов фотоядерных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS.

Научная новизна

В работе впервые были измерены абсолютные выходы фотопротонных реакций на естественной смеси изотопов эрбия. Также впервые получены сечения на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов диспрозия, палладия и молибдена при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ. Получены сечения на эквивалентный квант для распада обойденных ядер ^{92}Mo и ^{102}Pd .

Практическая значимость

Исследования выходов фотонуклонных реакций на средних и тяжелых ядрах необходимы для установления механизма фотоядерных реакций в области за ГДР, а также создания корректных моделей для описания подобных реакций. С практической точки зрения данные о выходах фотоядерных реакций важны для развития медицины и астрофизики. Выходы фотопротонных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена, приводящих к образованию ^{166}Ho , ^{161}Tb , ^{105}Rh , ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), необходимы для оценки возможностей наработки этих медицинских изотопов на ускорителях электронов фотоядерным методом. Изучение фотопротонных и фотонейтронных реакций на обойденных ядрах ^{164}Er , ^{162}Er , ^{158}Dy , ^{156}Dy , ^{102}Pd , ^{94}Mo , ^{92}Mo представляет интерес для астрофизики. Следует также отметить, что данные о выходах фотоядерных реакций на средних и тяжелых ядрах, полученные в настоящей работе, были использованы при подготовке первых гамма-активационных экспериментов на источнике обратного комптоновского рассеяния ИКИ НЦФМ (г. Саров, Россия).

Глава 1. Экспериментальное определение выходов и сечений фотоядерных реакций

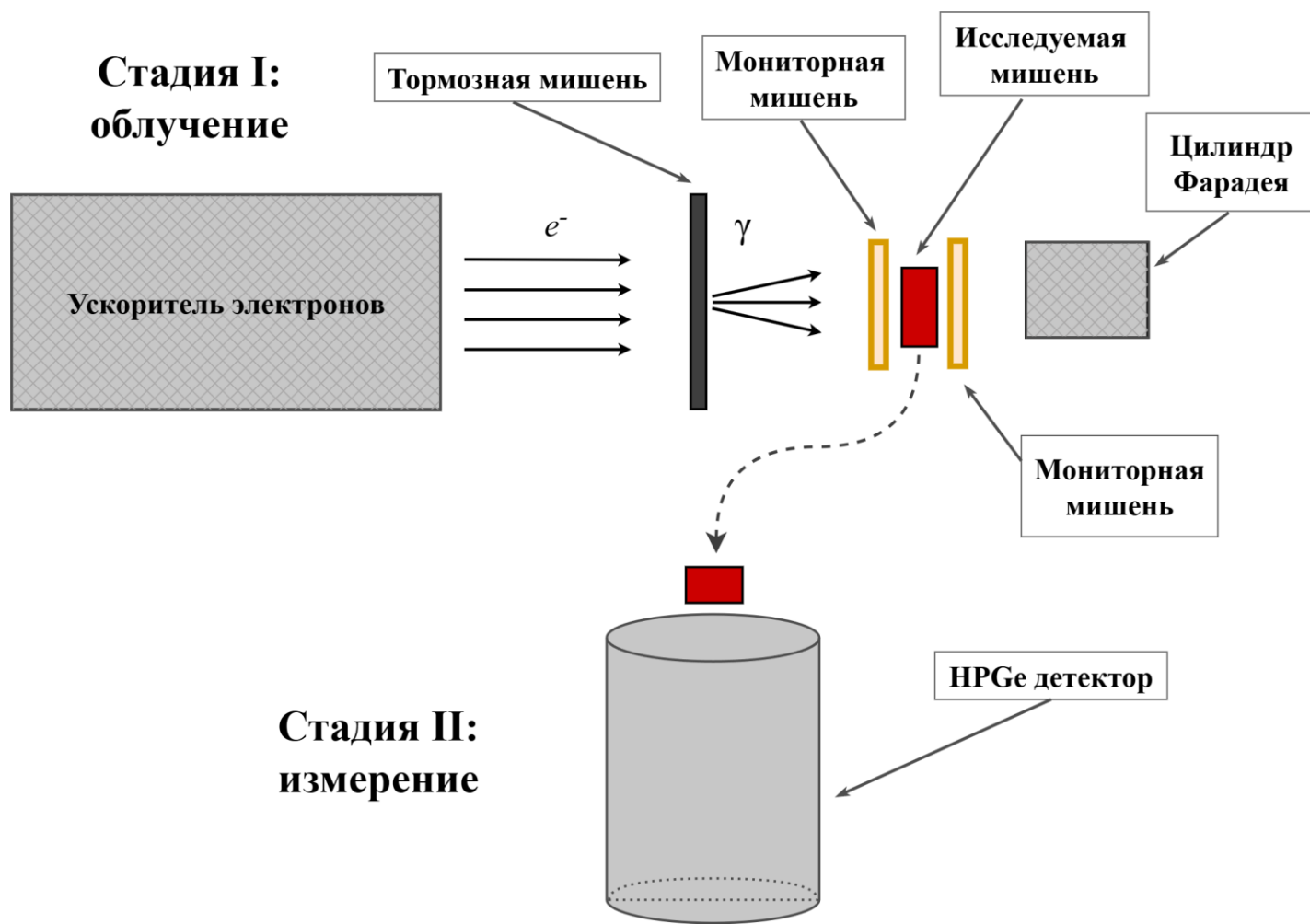


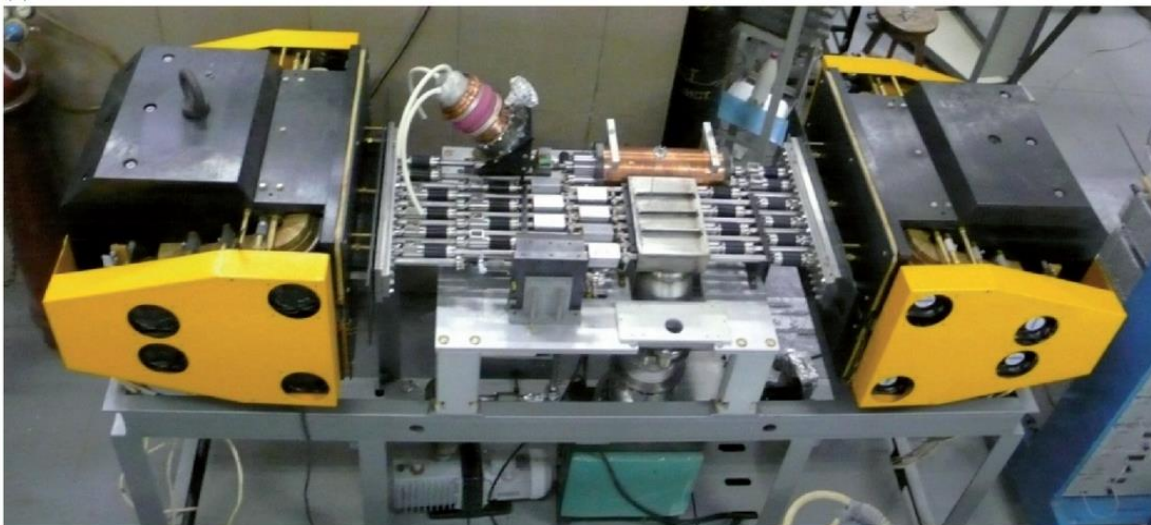
Схема проведения гамма-активационных экспериментов

Основными преимуществами гамма-активационного исследования фотоядерных реакций являются:

- возможность однозначной идентификации ядерных реакций по остаточной радиоактивности конечных ядер;
- высокая чувствительность метода, позволяющая регистрировать реакции с малыми сечениями;
- возможность использования не только обогащенных, но и мишеней естественного изотопного состава;
- возможность с помощью подбора параметров облучения образцов и режимов измерения спектров остаточной активности изучать как короткоживущие, так и долгоживущие радиоактивные ядра-продукты.

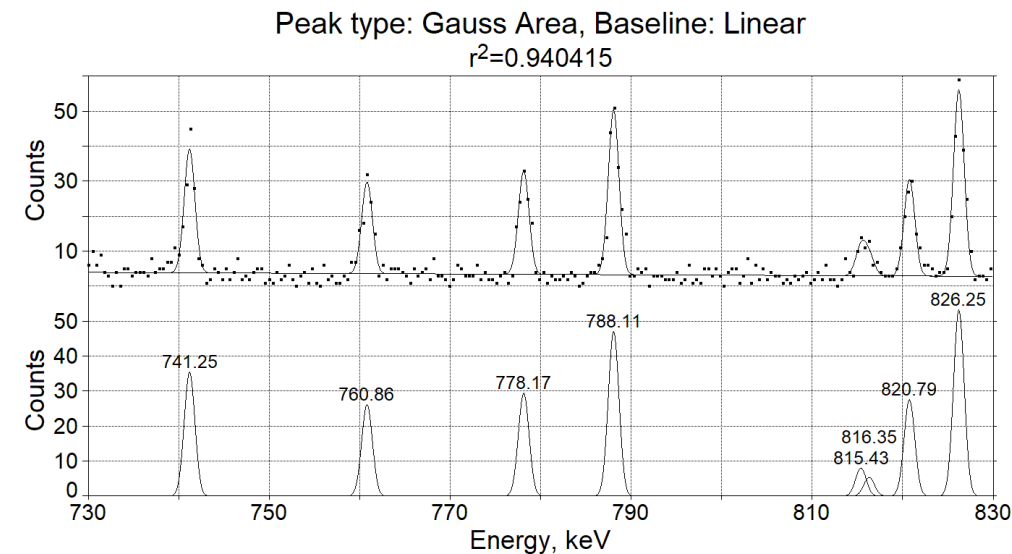
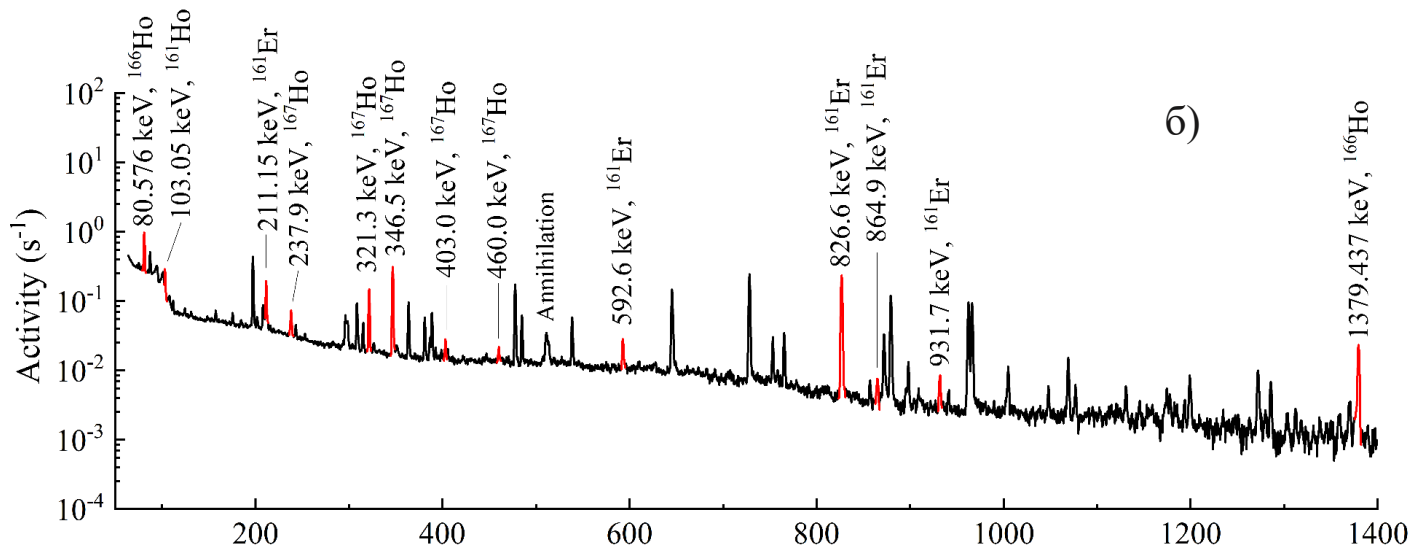
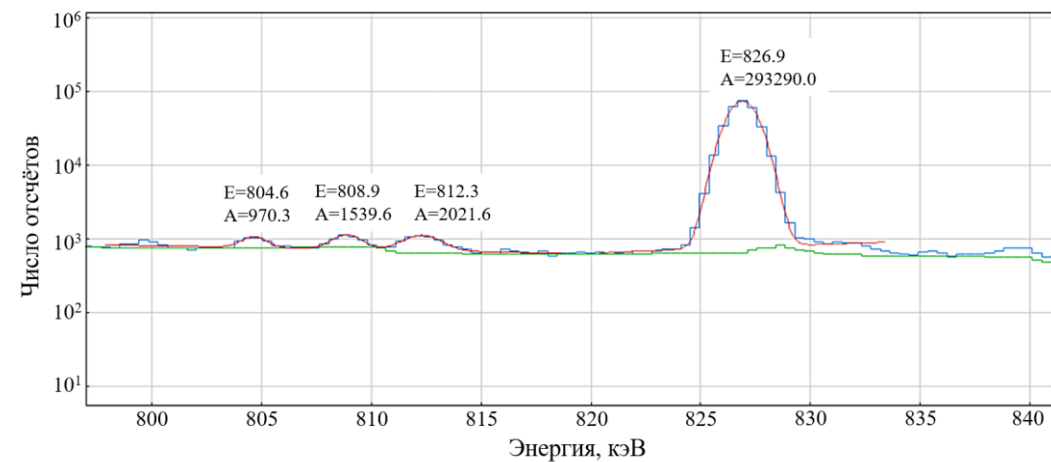
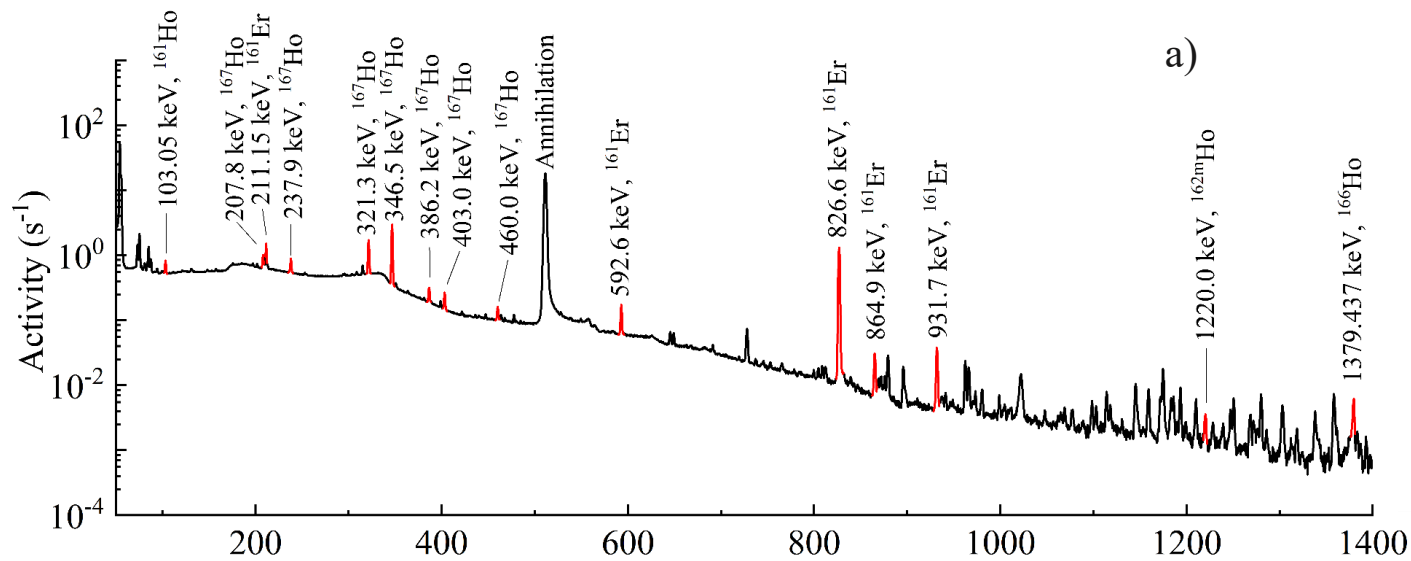
- Облучение мишеней проводилось на двух установках: импульсном разрезном микротроне РМ-55 НИИЯФ МГУ с максимальной энергией электронов 55 МэВ и микротроне МТ-25 лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова (ОИЯИ).

Общий вид импульсного разрезного микротрона РМ-55 НИИЯФ МГУ и микротрона МТ-25 ОИЯИ



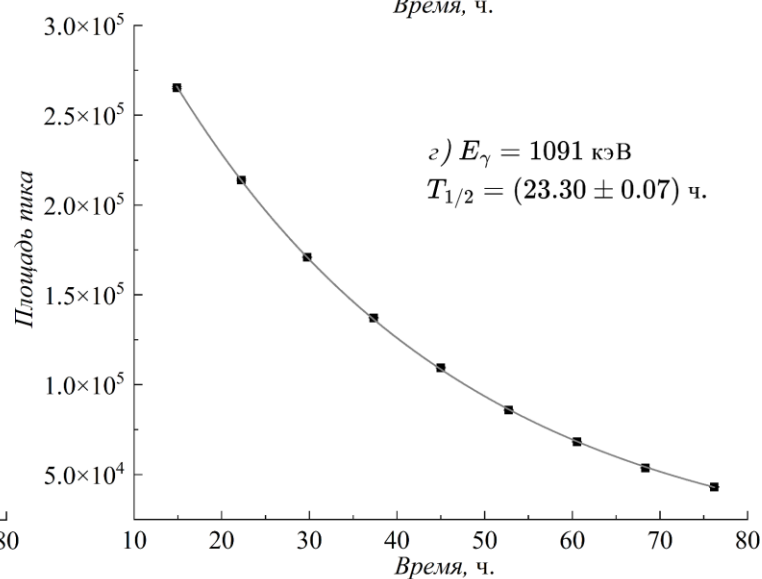
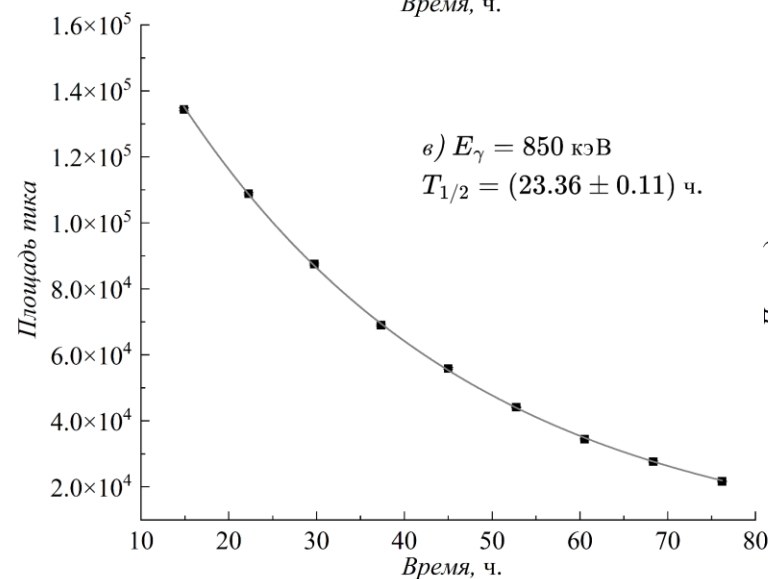
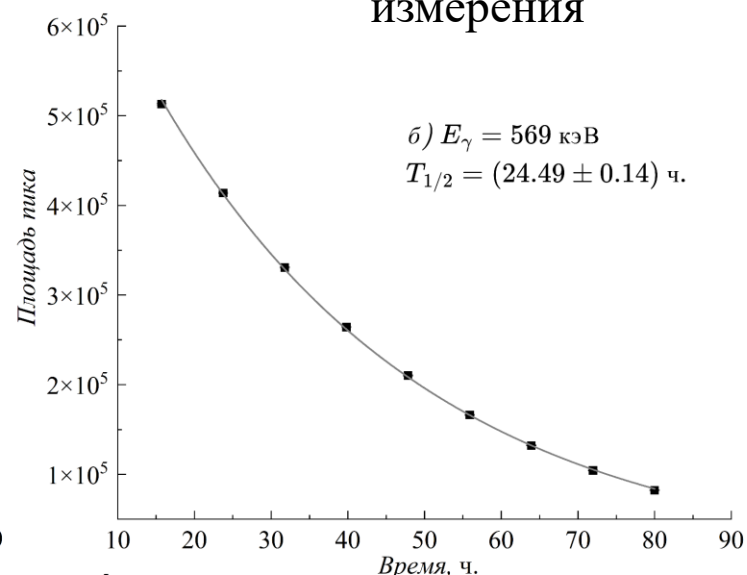
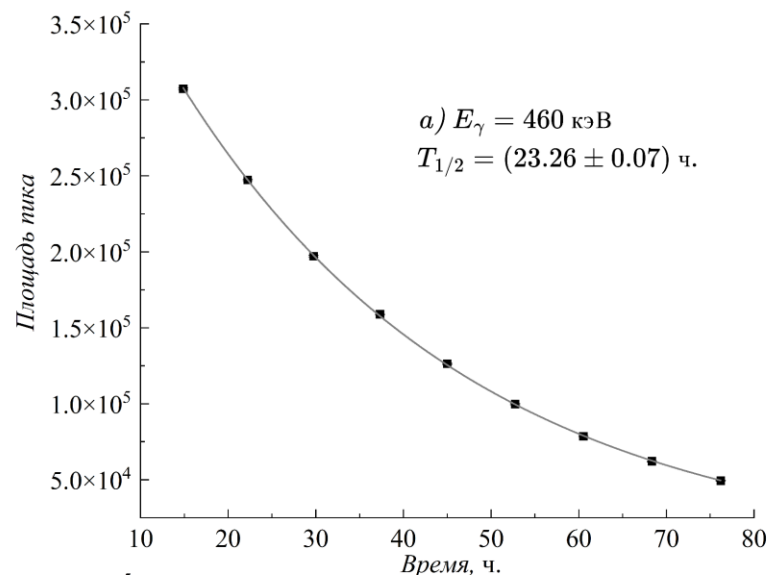
Основные характеристики используемых в экспериментах ускорителей электронов

	Микротрон МТ-25	РМ-55 НИИЯФ МГУ
Максимальная энергия электронов на выходе	25 МэВ	55.5 МэВ
Прирост энергии на оборот	0.6 - 1 МэВ	5 МэВ
Число орбит	25	11
Рабочая частота	2794 МГц	2856 МГц
Максимальная частота следования импульсов	380 Гц	50 Гц
Длительность импульса	2.5 мкс	8 мкс
Импульсный ток ускоренного пучка	20 мА	10 мА



Спектры остаточной активности облученного образца из природной смеси изотопов эрбия через 1 час и 1 день после окончания облучения. Время измерения спектров составляло 16 и 7 часов соответственно.

Методика определения периода полураспада изотопа по изменению площади пика с течением времени измерения



^{96}Nb ($T_{1/2} = 23.35$ ч.)

E_γ , кэВ	I_γ , %	$T_{1/2}$, ч.
460	26.62	23.26 ± 0.07
569	58	24.49 ± 0.14
850	20.45	23.36 ± 0.11
1091	48.5	23.30 ± 0.07

Пики с энергиями 460, 569, 850 и 1091 кэВ соответствуют распаду изотопа ^{96}Nb .

Экспериментальные выходы реакций рассчитывались по площадям фотопиков (S_1, S_2) в спектрах остаточной активности:

Один канал
образования
изотопа

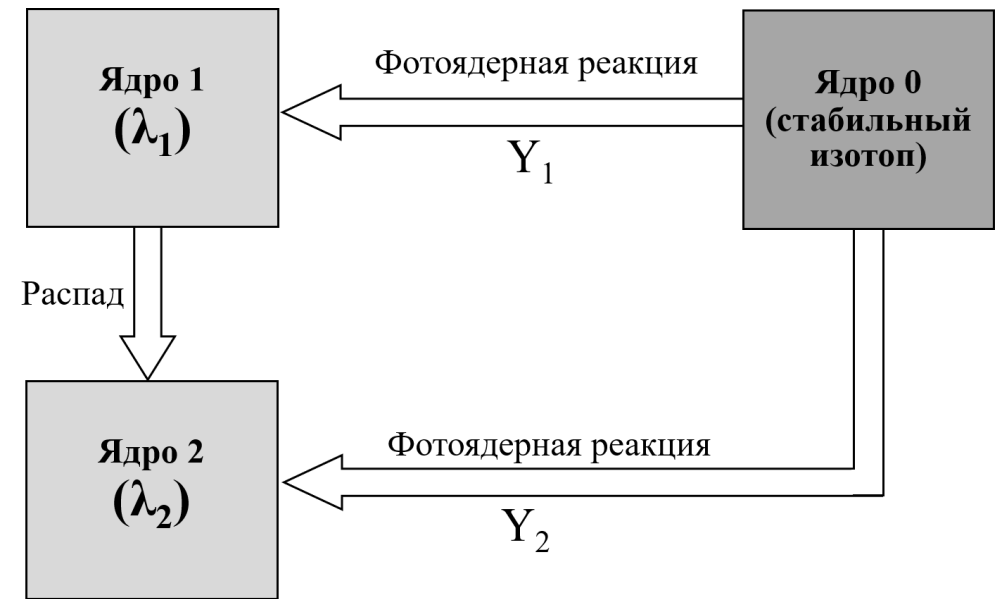
$$Y_1 = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{I \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

$$N_{10} = \frac{S_1}{\varepsilon_{\gamma 1} I_{\gamma 1} (e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)})}$$

Два канала
образования
изотопа

$$Y_2 = \frac{\lambda_2 \cdot N_{20}}{I(1 - e^{-\lambda_2 t_1})} - \chi Y_1 \frac{\lambda_2 \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) - \lambda_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t_1})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_2 t_1})}$$

$$N_{20} = \frac{S_2}{\varepsilon_{\gamma 2} I_{\gamma 2} (e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)})} + \frac{\chi N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_1 - \lambda_2 \frac{e^{-\lambda_1(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_1(t_3-t_1)}}{e^{-\lambda_2(t_2-t_1)} - e^{-\lambda_2(t_3-t_1)}} \right)$$



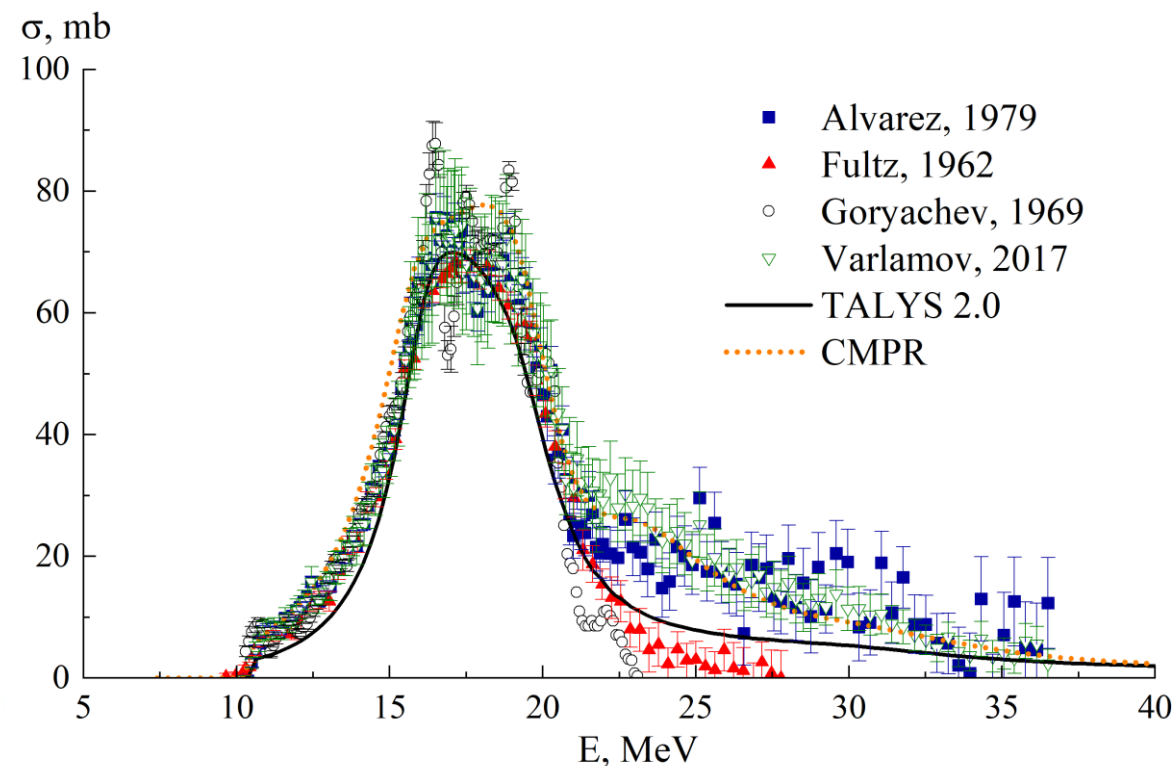
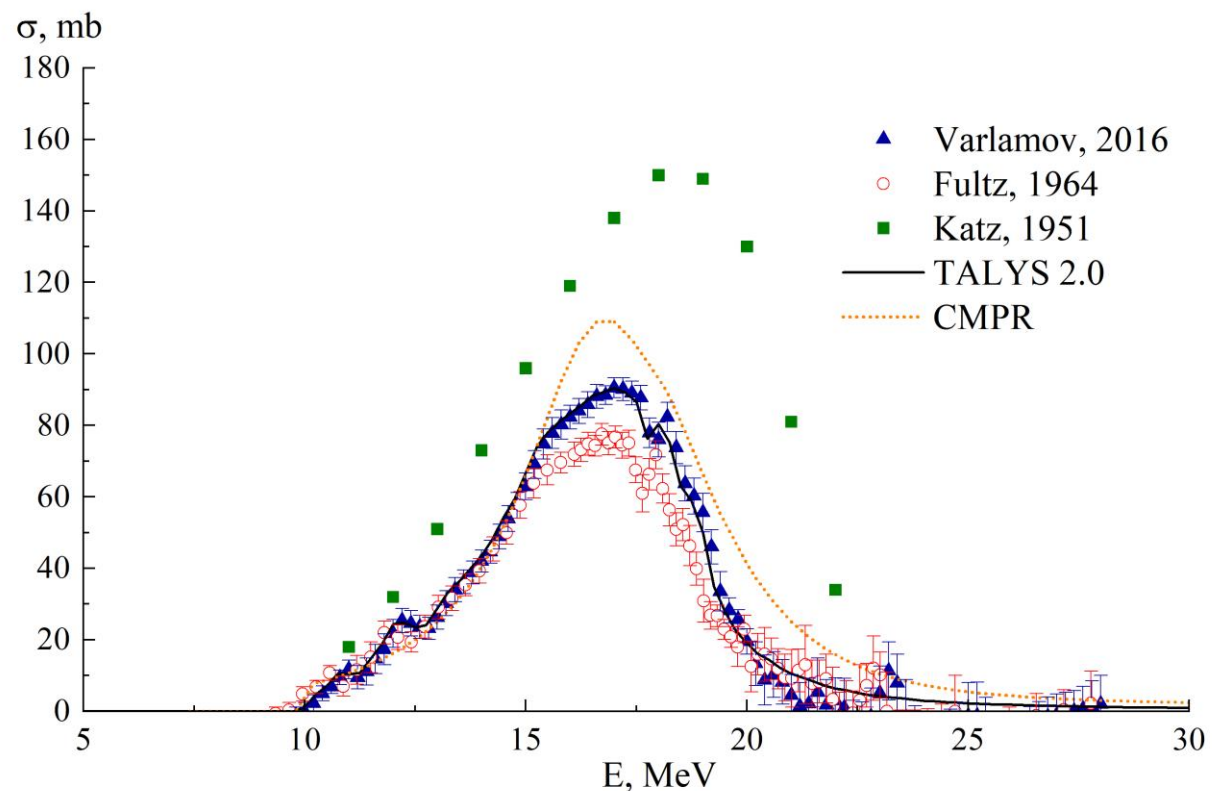
Y_1 и Y_2 - выходы образования ядер 1 и 2, χ - коэффициент распада родительского изотопа на дочерний, N_{10} и N_{20} - число ядер 1 и 2 на момент окончания облучения, $\varepsilon_{\gamma 1,2}$ - эффективности регистрации гамма-квантов определенной энергии, $I_{\gamma 1,2}$ - квантовые выходы, $\lambda_{1,2}$ - постоянные распада изотопов 1 и 2, I - средний ток ускорителя, t_1 - время облучения, t_2 - время начала измерения спектров, t_3 - время окончания измерения спектров.

Определение абсолютных выходов фотоядерных реакций

$$Y_{\text{без норм.}} = K_{\text{норм.}} Y_{\text{теор.}} = K_{\text{норм.}} \frac{\eta \rho_{\text{пов.}} N_A}{A} \int_{E_{\text{thr}}}^{E_e} W(E_\gamma, E_e) \sigma(E_\gamma) dE_\gamma$$

$$K_{\text{норм.}} = \frac{Y_{\text{без норм.}}^{\text{монитор}}}{Y_{\text{теор.}}^{\text{монитор}}}$$

$$Y_{\text{абс. эксп.}} = \frac{Y_{\text{без норм.}}}{K_{\text{норм.}}}$$



Сечения фотонейтронных реакций реакции $^{65}\text{Cu}(\gamma, 1n)^{64}\text{Cu}$ и $^{59}\text{Co}(\gamma, 1n)^{58}\text{Co}$, полученные в различных работах и рассчитанные на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Чтобы сравнить результаты разных экспериментов, необходимо предположить, что формы спектров тормозного излучения в сравниваемых экспериментах не различаются, и разница наблюдается только в общем количестве фотонов.

1. Среднее сечение, взвешенное по тормозному спектру:

Моноизотоп

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\int_{E_{thr}}^{E^m} W(E, E^m) dE}$$

Естественная смесь

$$\langle \sigma \rangle = \sum_i \eta_i \frac{\int_{E_{i thr}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\int_{E_{i thr}}^{E^m} W(E, E^m) dE}$$

2. Сечение на эквивалентный квант:

Моноизотоп

$$\sigma_q = \frac{\int_{E_{thr}}^{E^m} \sigma(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}$$

Естественная смесь

$$\sigma_q^{prod} = \frac{\sum_i \eta_i \int_{E_{i thr}}^{E^m} \sigma_i(E) \cdot W(E, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E \cdot W(E, E^m) dE}$$

$E^m = 55$ МэВ - кинетическая энергия электронов, падающих на вольфрамовую мишень-конвертор, E - энергия тормозных гамма-квантов, E_{thr} - порог исследуемой фотоядерной реакции, $\sigma(E)$ - сечение исследуемой фотоядерной реакции, $W(E, E^m)$ - спектр тормозного излучения.

Глава 2. Расчёт теоретических выходов фотоядерных реакций

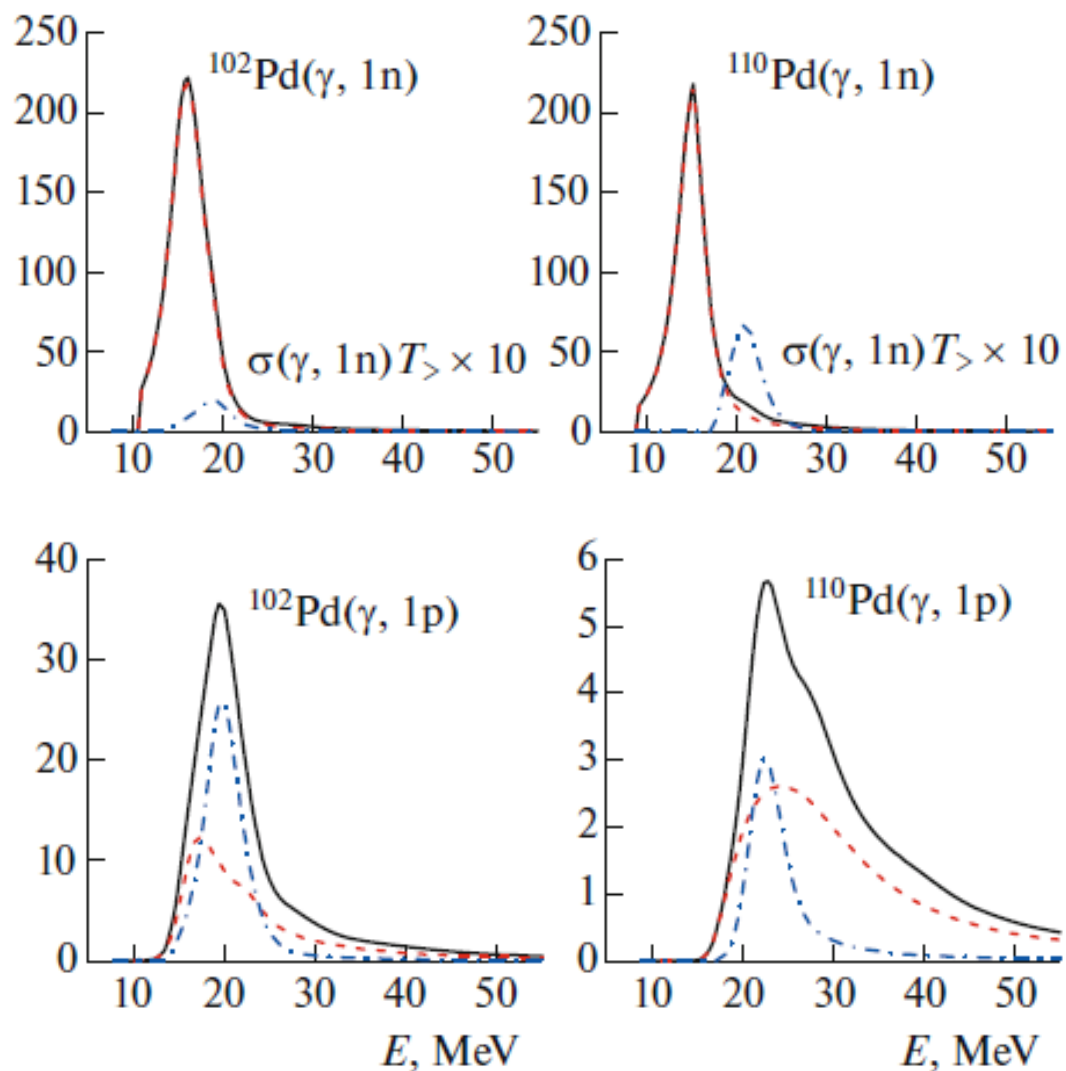
Комбинированная модель фотонуклонных реакций

Комбинированная модель фотонуклонных реакций (КМФР) - вычислительная модель для описания сечений парциальных реакций и энергетических спектров вылетающих частиц в фотоядерных реакциях в области энергий ГДР. Автор модели: В.Н. Орлин (НИИЯФ МГУ).



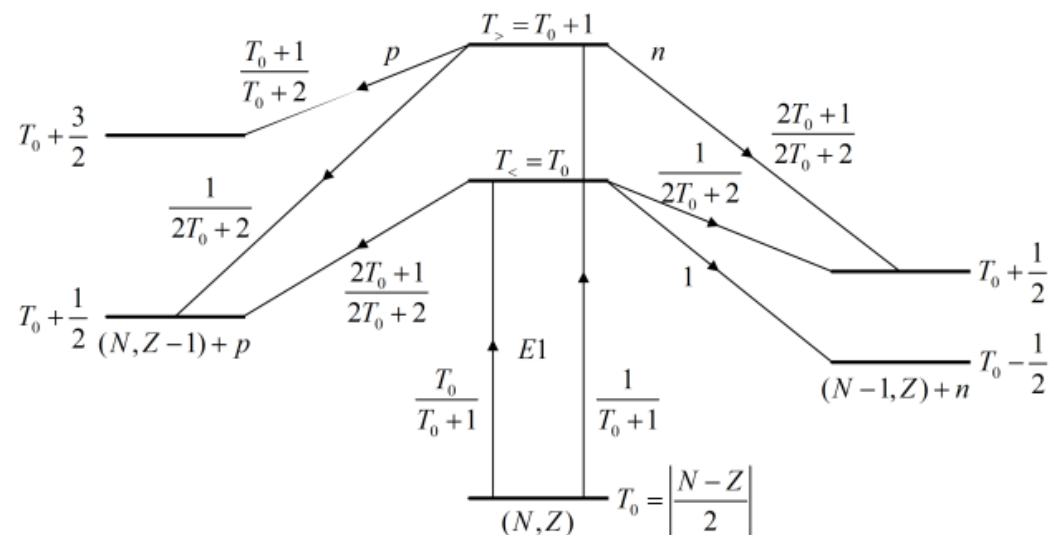
В рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций предполагается разделение ядерной реакции на две независимые стадии: образование составной системы и распад этой системы на продукты реакции.

Первая стадия описывается с помощью полумикроскопической модели колебаний (ПМК) и квазидейтронной модели фотопоглощения (КДМ), вторая - с помощью экситонной (ЭМ) и испарительной моделей (ИМ).



Сечения реакций с вылетом одного нейтрона и одного протона на изотопах ^{102}Pd и ^{110}Pd , рассчитанные на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций

Схема возбуждения состояний $T_<$ и $T_>$ в ядре (N, Z) и их распад по нейтронному и протонному каналам



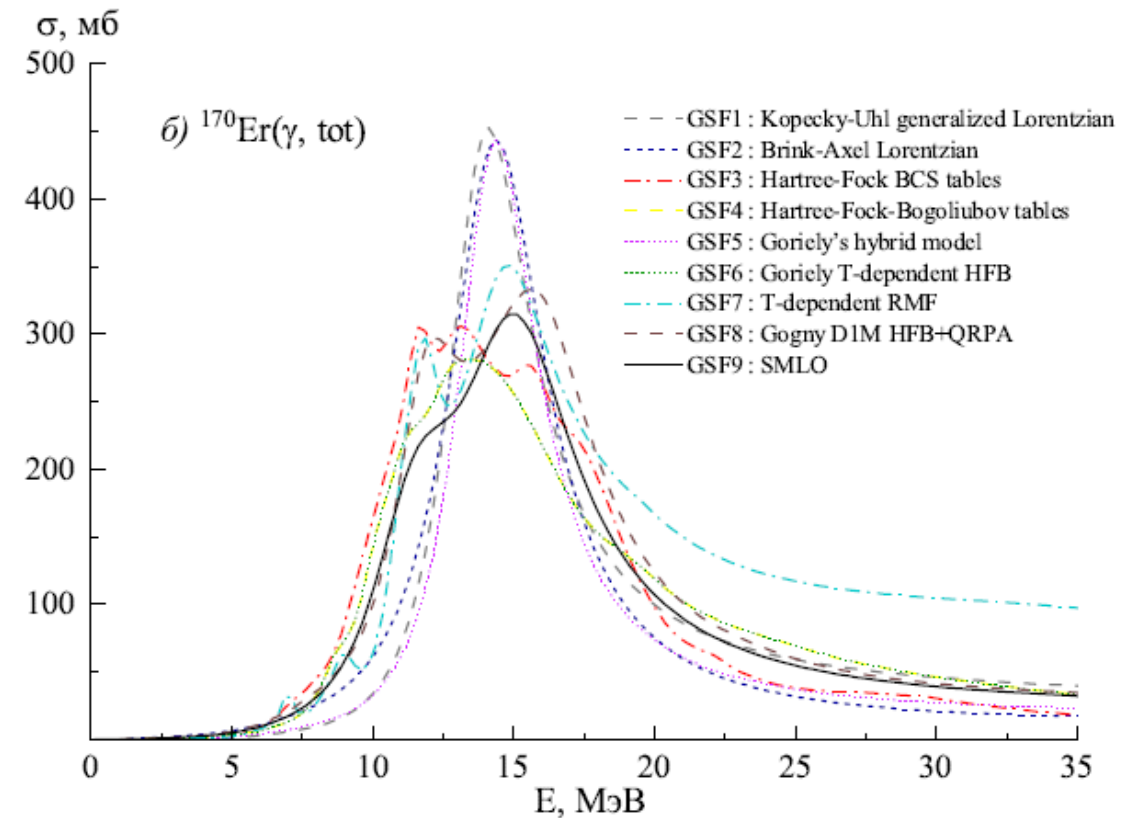
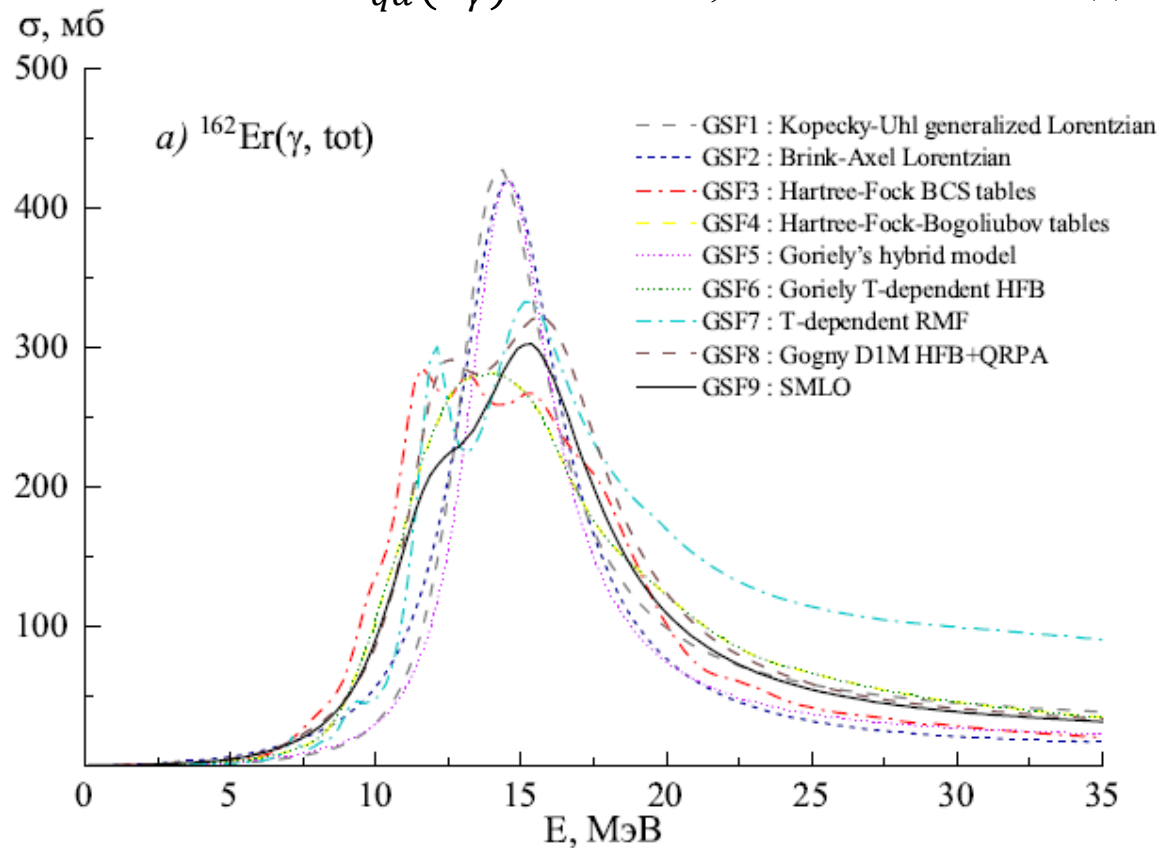
Главное отличие комбинированной модели фотонуклонных реакций от других моделей заключается в учете:

- влияния изоспиновых эффектов на эволюцию возбужденного состояния ядра, возникшего после поглощения фотона;
- изовекторного гигантского квадрупольного резонанса (ГКР);
- обертона ГДР (ГДР2).

Программный код TALYS

$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \sigma_{GDR\ PSF}(E_\gamma) + \sigma_{qd}(E_\gamma)$$

где $\sigma_{GDR\ PSF}(E_\gamma)$ - сечение ГДР, рассчитанное с помощью фотонной силовой функции,
 $\sigma_{qd}(E_\gamma)$ - сечение, связанное с квазидейтронным механизмом фотопоглощения.

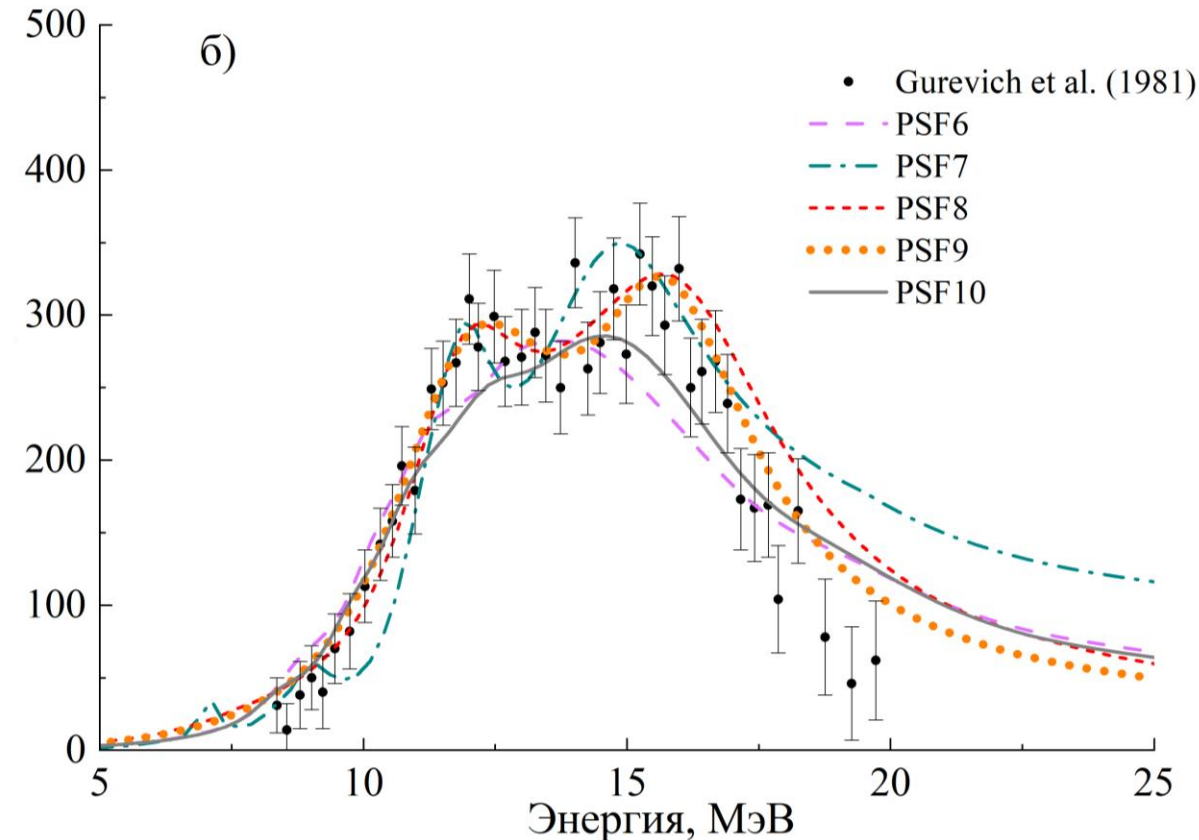
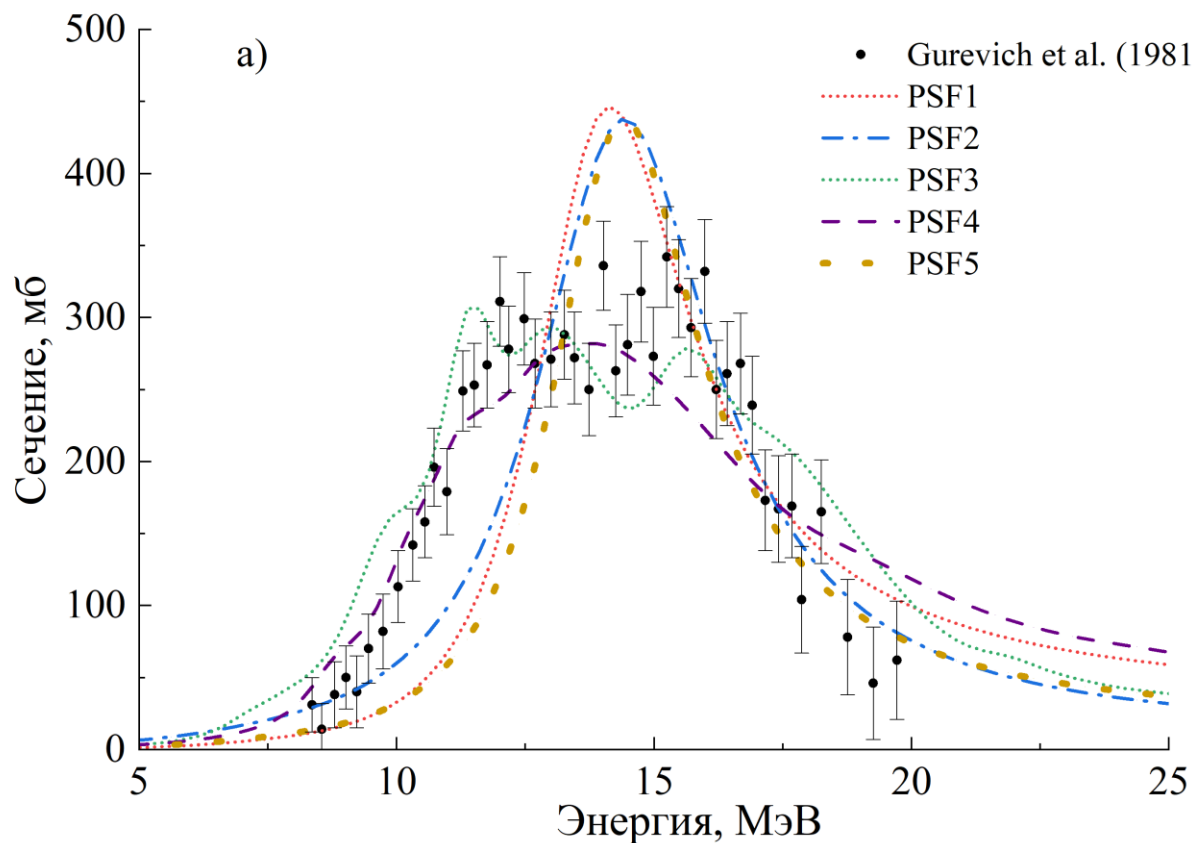


Сечения реакций $^{162}\text{Er}(\gamma, \text{tot})$ и $^{170}\text{Er}(\gamma, \text{tot})$, рассчитанные с помощью различных фотонных силовых функций по программе TALYS 2.0

Фотонные силовые функции 3 и 8–10 отвечают критериям учета деформации ядер и обеспечивают хорошее описание фотонейтронных реакций в TALYS 2.0.

PSF 3. Hartree-Fock Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) tables;
PSF 8. Gogny D1M HFB+QRPA;

PSF 9. Simplified Modified Lorentzian (SMLO);
PSF 10. Skyrme HFB+QRPA.



Сравнение экспериментальных данных о сечении реакции $^{168}\text{Er}(\gamma, \text{abs})$ с расчётами, выполненными с помощью различных силовых функций по программе TALYS 2.0

Квазидейтронный механизм фотопоглощения

Квазидейтронную модель фоторасщепления впервые предложил Левинджер. Левинджер предположил, что сечение ядерного фоторасщепления выше ГДР $\sigma_{qd}(E)$ может быть описано в терминах сечения фоторасщепления свободного дейтрона $\sigma_d(E)$:

$$\sigma_{qd}(E) = L \frac{NZ}{A} \sigma_d(E) f(E)$$

где E означает энергию падающего фотона, L - параметр Левинджера, A - массовое число, N - число нейтронов, Z - число протонов, $f(E)$ - Паули-блокинг функция.

Параметризация сечения фоторасщепления свободного дейтрона:

$$\sigma_d(E) = 61.2 \frac{(E-2.224)^{3/2}}{E^3} \text{ мб}$$

где E выражается в МэВ, а энергия связи свободного дейтрона равна 2.224 МэВ.

Паули-блокинг функция имеет следующий вид:

$$f(E) = 8.3714 \cdot 10^{-2} - 9.8343 \cdot 10^{-3} E + 4.1222 \cdot 10^{-4} E^2 - 3.4762 \cdot 10^{-6} E^3 + 9.3537 \cdot 10^{-9} E^4$$

Глава 3. Экспериментальные выходы и сечения на эквивалентный квант для фотоядерных реакций на изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена

Различие между экспериментальными и теоретическими значениями сечений на эквивалентный квант для образования ^{161}Er может быть обусловлена двумя причинами:

- выбор параметра деформации исходного ядра оказывает существенное влияние на теоретический расчёт полного сечения фотопоглощения;
- из-за низкого процентного содержания ^{162}Er в природной смеси изотопов большой вклад в образование ^{161}Er вносят многонуклонные реакции, для которых отсутствуют экспериментальные данные.

Изотоп	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{q \text{ CMPR}}^{\text{prod}}$, мб	$\sigma_{q \text{ TALYS}}^{\text{prod}}$, мб
^{161}Er	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, xn) =$ $0.00139 \cdot ^{162}\text{Er}(\gamma, 1n) +$ $0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 3n) +$ $0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 5n) +$ $0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 6n)$	9.20 24.96 40.08 46.52	0.308 ± 0.026	0.459 0.283 0.074 0.100 0.002	0.539 0.266 0.122 0.145 0.006
^{163}Er	$^{\text{nat}}\text{Er}(\gamma, xn) =$ $0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1n) +$ $0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 3n) +$ $0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 4n) +$ $0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 5n)$	8.85 23.97 30.41 38.18	4.93 ± 0.96	5.765 3.304 1.870 0.455 0.136	6.913 3.10 2.918 0.722 0.205
^{169}Er	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1n)$	7.26	18.80 ± 4.38	26.982	23.036

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций с теоретическими расчётами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Изотоп	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	σ_q^{prod} , мб	σ_q^{prod} , мб	σ_q^{prod} , мб
^{161}Ho	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1pxn) =$ $0.00139 \cdot ^{162}\text{Er}(\gamma, 1p) +$ $0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1p2n) +$ $0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 1p4n) +$ $0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p5n)$	6.43 22.18 37.30 43.74	$(28.07 \pm 23.44) \cdot 10^{-3}$	$10.27 \cdot 10^{-3}$ $5.38 \cdot 10^{-3}$ $3.83 \cdot 10^{-3}$ $1.06 \cdot 10^{-3}$ $1.55 \cdot 10^{-6}$	$5.88 \cdot 10^{-3}$ $0.81 \cdot 10^{-3}$ $3.17 \cdot 10^{-3}$ $1.86 \cdot 10^{-3}$ $3.90 \cdot 10^{-5}$
^{162m}Ho	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1pxn) =$ $0.01601 \cdot ^{164}\text{Er}(\gamma, 1p1n) +$ $0.33503 \cdot ^{166}\text{Er}(\gamma, 1p3n) +$ $0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p4n)$	15.366 30.496 36.926	$(5.40 \pm 0.63) \cdot 10^{-3}$		$7.92 \cdot 10^{-3}$ $2.13 \cdot 10^{-3}$ $5.20 \cdot 10^{-3}$ $0.57 \cdot 10^{-3}$
^{166g}Ho	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1pxn) =$ $0.22869 \cdot ^{167}\text{Er}(\gamma, 1p) +$ $0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 1p1n) +$ $0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p3n)$	7.51 15.28 28.54	0.311 ± 0.012	0.594* 0.453 0.134 0.007	0.101 0.046 0.051 0.005
^{167}Ho	$^{nat}\text{Er}(\gamma, 1pxn) =$ $0.26978 \cdot ^{168}\text{Er}(\gamma, 1p) +$ $0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p2n)$	8.00 21.26	0.264 ± 0.061	0.617 0.589 0.028	0.078 0.056 0.022
^{169}Ho	$0.1491 \cdot ^{170}\text{Er}(\gamma, 1p)$	8.60	0.132 ± 0.031	0.255	0.024

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на изотопах диспрозия с расчётами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q\,exp}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\,CMPR}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\,TALYS}^{prod}$, мб
^{155}Dy	9.92 ч.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in) =$ $0.00056 \cdot ^{156}\text{Dy}(\gamma, 1n) +$ $0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 3n) +$ $0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 5n)$	9.44 25.47 40.87 47.33	0.051 ± 0.002	0.104 0.098 0.004 0.002	0.112 0.092 0.007 0.010
^{157}Dy	8.14 ч.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in) =$ $0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 1n) +$ $0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 3n) +$ $0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 4n) +$ $0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 5n)$	9.05 24.46 30.92 39.11	0.400 ± 0.014	0.779 0.171 0.121 0.359 0.127	1.153 0.163 0.195 0.605 0.175
^{159}Dy	145.3 дн.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in) =$ $0.02329 \cdot ^{160}\text{Dy}(\gamma, 1n) +$ $0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 2n) +$ $0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 3n) +$ $0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 4n)$	8.58 15.03 23.23 29.50	8.16 ± 0.49	15.94 4.12 9.36 1.64 0.55	18.90 3.89 11.57 2.50 0.94

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах диспрозия с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , MeV	σ_q^{prod} , мб σ_q^{exp}	σ_q^{prod} , мб σ_q^{CMPR}	σ_q^{prod} , мб σ_q^{TALYS}
^{155}Tb	5.32 дн.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in1p) =$ $0.00056 \cdot ^{156}\text{Dy}(\gamma, 1p) +$ $0.00095 \cdot ^{158}\text{Dy}(\gamma, 2n1p)$	6.57 22.59	$(6.07 \pm 3.20) \cdot 10^{-3}$	$2.97 \cdot 10^{-3}$ $2.65 \cdot 10^{-3}$ $0.31 \cdot 10^{-3}$	$3.84 \cdot 10^{-3}$ $0.36 \cdot 10^{-3}$ $0.22 \cdot 10^{-3}$
^{160}Tb	72.3 дн.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in1p) =$ $0.18889 \cdot ^{161}\text{Dy}(\gamma, 1p) +$ $0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1n1p) +$ $0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 2n1p) +$ $0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 3n1p)$	7.51 15.70 21.98 29.63	0.305 ± 0.005	0.715 0.500 0.142 0.057 0.015	0.195 0.052 0.087 0.042 0.014
^{161}Tb	6.96 дн.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in1p) =$ $0.25475 \cdot ^{162}\text{Dy}(\gamma, 1p) +$ $0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1n1p) +$ $0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 2n1p)$	8.01 14.28 21.94	0.463 ± 0.023	0.877 0.625 0.187 0.065	0.217 0.065 0.105 0.047
^{162}Tb	7.60 мин.	$^{nat}\text{Dy}(\gamma, in1p) =$ $0.24896 \cdot ^{163}\text{Dy}(\gamma, 1p) +$ $0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1n1p)$	7.99 15.65	0.261 ± 0.015	0.700 0.570 0.130	0.160 0.064 0.096
^{163}Tb	19.5 мин.	$0.2826 \cdot ^{164}\text{Dy}(\gamma, 1p)$	8.66	0.197 ± 0.013	0.556	0.051

Сравнение относительных экспериментальных выходов, полученных в данной работе и работах [1-3], с теоретическими расчетами. Выходы нормированы на выход ^{155}Dy на естественной смеси изотопов диспрозия

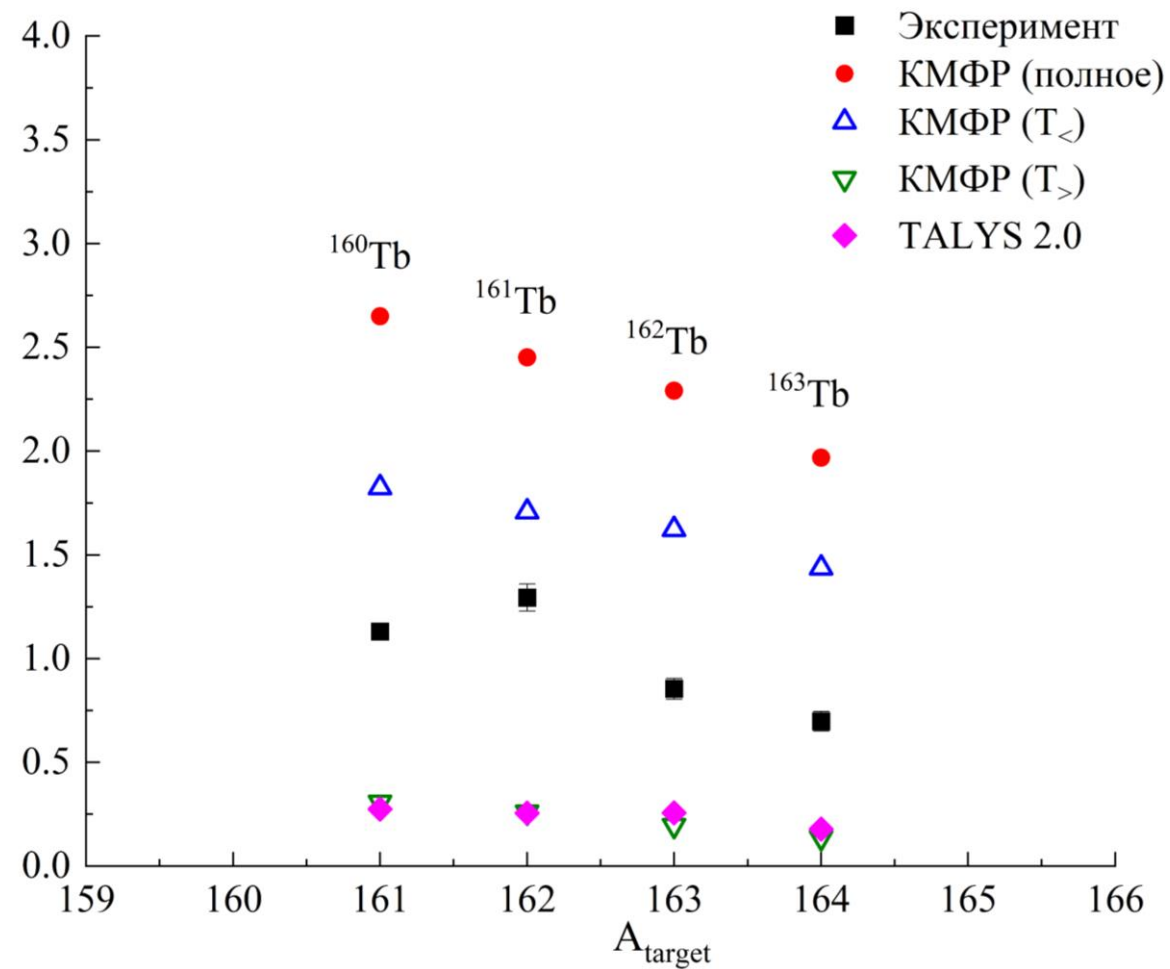
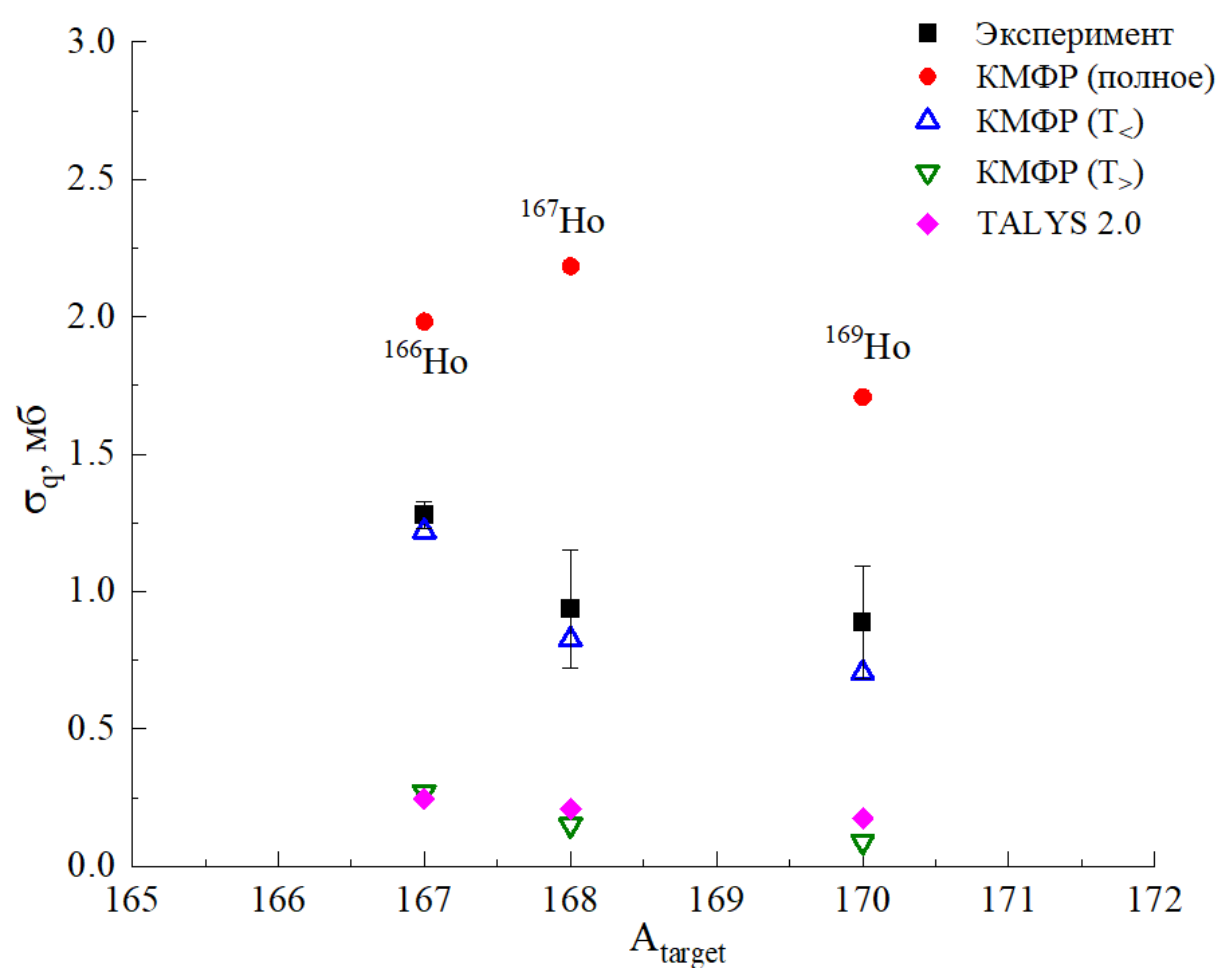
Изотоп	E^m , МэВ	$Y_{\text{отн.}}$	$Y_{\text{отн.наст.работа}}$	$Y_{\text{отн.теор.}}$
^{157}Dy	12	1.85 ± 0.23 [1]	—	2.20
	14	1.98 ± 0.78 [2] 1.42 ± 0.15 [1]	—	1.90
	16	1.88 ± 0.19 [1]	—	1.81
	55	8.06 ± 1.53 [3]	7.88 ± 0.40	7.47
	65	6.39 ± 1.09 [1]	—	5.18
	75	5.40 ± 1.12 [1]	—	3.60
^{159}Dy	55	—	160.9 ± 11.5	112.80
	65	60.20 ± 12.57 [1]	—	57.64
	75	42.96 ± 8.87 [1]	—	34.93
^{160}Tb	55	7.18 ± 1.38 [3]	6.06 ± 0.64	5.43
^{161}Tb	55	9.56 ± 1.74 [3]	9.13 ± 0.58	6.57
^{163}Tb	55	2.84 ± 0.63 [3]	3.89 ± 0.30	4.02

[1] Naik H., Kim G.N., Schwengner R. et al. // Eur. Phys. J. A 56, N 264 (2020).

[2] Vagena E., Stoulos S. // Eur. Phys. J. A 53 (2017).

[3] Fedotova A.O., Aliev R.A., Egorova B.V. et al. // Applied Radiation and Isotopes 198, 110840(2023).

Экспериментальные и теоретические сечения на эквивалентный квант для реакции (γ , 1p)
на стабильных изотопах эрбия и диспрозия



Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на
изотопах палладия с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по
программе TALYS 2.0

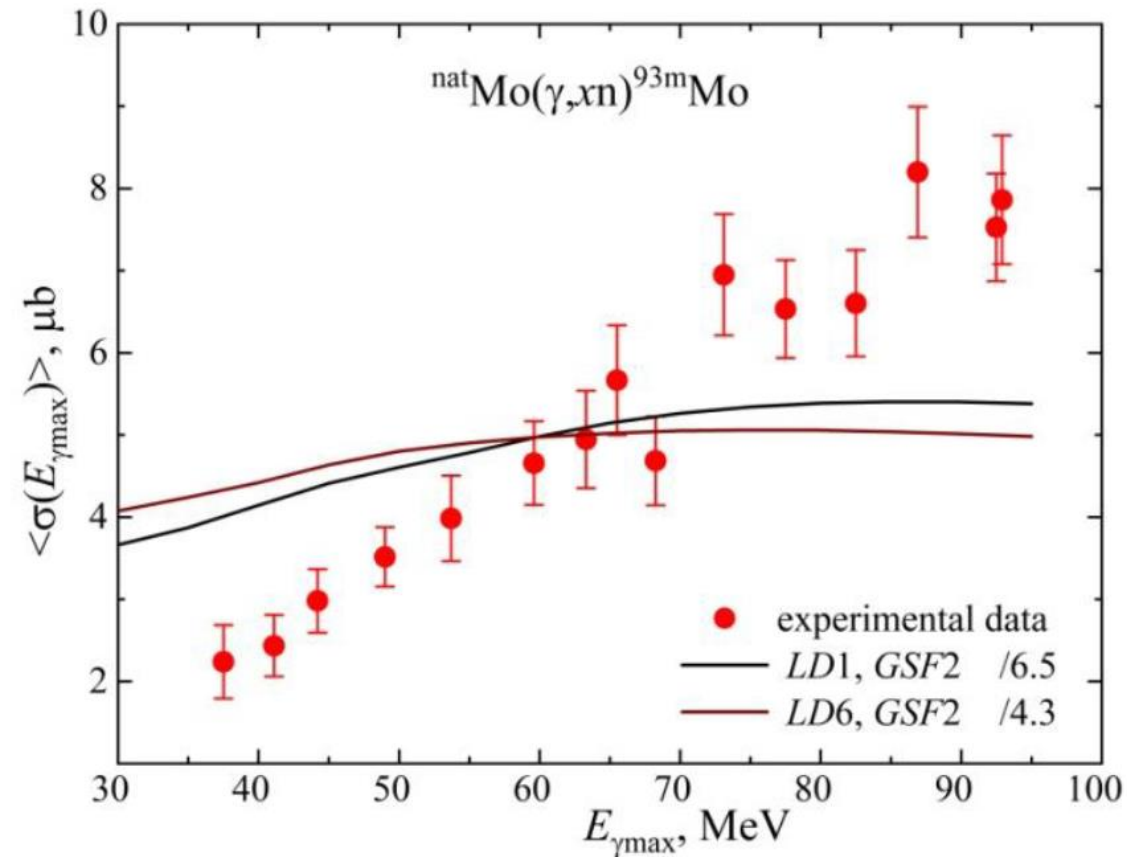
Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q\ exp}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\ CMPR}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\ TALYS}^{prod}$, мб
$^{109m+g}\text{Pd}$	g: 13.4 ч. ($5/2^+$) m: 4.7 мин. ($11/2^-$)	$0.1172 \cdot ^{110}\text{Pd}(\gamma, 1n)$	8.8	9.00 ± 0.84	9.71	8.46
^{103}Pd	17 дн.	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in)=$ $0.1114 \cdot ^{104}\text{Pd}(\gamma, 1n)+$ $0.2233 \cdot ^{105}\text{Pd}(\gamma, 2n)+$ $0.2733 \cdot ^{106}\text{Pd}(\gamma, 3n)$	10.0 17.1 26.6	14.1 ± 0.7	15.40 10.21 4.39 0.80	15.53 10.02 4.74 0.77
^{101}Pd	8.47 ч.	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in)=$ $0.0102 \cdot ^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n)+$ $0.1114 \cdot ^{104}\text{Pd}(\gamma, 3n)+$ $0.2233 \cdot ^{105}\text{Pd}(\gamma, 4n)$	10.5 28.2 35.3	0.933 ± 0.049	1.264 0.895 0.218 0.152	1.284 0.900 0.231 0.154
^{100}Pd	3.63 дн.	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in)=$ $0.0102 \cdot ^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)+$ $0.1114 \cdot ^{104}\text{Pd}(\gamma, 4n)+$ $0.2233 \cdot ^{105}\text{Pd}(\gamma, 5n)$	18.8 36.5 43.5	0.154 ± 0.011	0.152 0.091 0.050 0.011	0.182 0.116 0.050 0.016
^{99}Pd	21.4 мин.	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in)=$ $0.0102 \cdot ^{102}\text{Pd}(\gamma, 3n)+$ $0.1114 \cdot ^{104}\text{Pd}(\gamma, 5n)$	29.9 47.6	$(6.19 \pm 0.30) \cdot 10^{-3}$	$9.11 \cdot 10^{-3}$ $8.72 \cdot 10^{-3}$ $0.39 \cdot 10^{-3}$	$8.69 \cdot 10^{-3}$ $8.69 \cdot 10^{-3}$

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах палладия с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	σ_q^{prod} $\sigma_{q\ exp}$, мб	σ_q^{prod} $\sigma_{q\ CMPR}$, мб	σ_q^{prod} $\sigma_{q\ TALYS}$, мб
^{109}Rh	80.8 с.	$0.1172 \cdot ^{110}\text{Pd}(\gamma, 1p)$	10.6	0.284 ± 0.017	0.334	0.019
^{107}Rh	21.7 мин.	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in1p)=$ $0.2646 \cdot ^{108}\text{Pd}(\gamma, 1p)+$ $0.1172 \cdot ^{110}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)$	9.9 16.4	0.732 ± 0.062	1.069 1.032 0.037	0.097 0.082 0.025
$^{105g+m}\text{Rh}$	g: 35.34 ч. ($7/2^+$) m: 42.8 с. ($1/2^-$)	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in1p)=$ $0.2733 \cdot ^{106}\text{Pd}(\gamma, 1p)+$ $0.2646 \cdot ^{108}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)$	9.3 16.6	1.078 ± 0.042	1.618 1.523 0.094	0.156 0.104 0.052
$^{104g+m}\text{Rh}$	g: 42.3 с. (1^+) m: 4.36 мин. (5^+)	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in1p)=$ $0.2233 \cdot ^{105}\text{Pd}(\gamma, 1p)+$ $0.2733 \cdot ^{106}\text{Pd}(\gamma, 1n1p)+$ $0.2646 \cdot ^{108}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)$	8.8 18.3 34.1	3.23 ± 1.51	1.79 1.48 0.285 0.024	0.220 0.122 0.081 0.016
$^{102g+m}\text{Rh}$	g: 207.3 дн. (2^-) m: 3.47 лет (6^+)	$^{nat}\text{Pd}(\gamma, in1p)=$ $0.1114 \cdot ^{104}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)+$ $0.2233 \cdot ^{105}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)+$ $0.2733 \cdot ^{106}\text{Pd}(\gamma, 3n1p)$	18.0 25.1 34.6	0.274 ± 0.024	0.350 0.184 0.127 0.039	0.176 0.074 0.075 0.028

Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотонейтронных реакций на изотопах молибдена с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	σ_q^{prod} , мб σ_q^{exp}	σ_q^{prod} , мб σ_q^{CMPR}	σ_q^{prod} , мб σ_q^{TALYS}
^{99}Mo	65.9 ч.	$0.09744 \cdot ^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n)$	8.29	6.03 ± 0.40	7.09	7.08
^{93m}Mo	6.85 ч.	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in)=$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n)+$ $0.15873 \cdot ^{95}\text{Mo}(\gamma, 2n)+$ $0.16673 \cdot ^{96}\text{Mo}(\gamma, 3n)+$ $0.09582 \cdot ^{97}\text{Mo}(\gamma, 4n)$	12.10 19.47 28.62 33.02	$(3.51 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$		$60.95 \cdot 10^{-3}$ $26.69 \cdot 10^{-3}$ $15.96 \cdot 10^{-3}$ $16.69 \cdot 10^{-3}$ $1.34 \cdot 10^{-3}$
$^{91m+g}\text{Mo}$	g: 15.49 мин. ($9/2^+$) m: 65 с. ($1/2^-$)	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in)=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 3n)+$ $0.15873 \cdot ^{95}\text{Mo}(\gamma, 4n)$	12.67 30.42 37.79	7.16 ± 0.37	7.25 7.23 0.02 $3.4 \cdot 10^{-3}$	7.83 7.76 0.06 0.01
^{90}Mo	5.56 ч.	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in)=$ $0.14649 \cdot ^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n)+$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 4n)$	22.78 40.53	0.272 ± 0.015	0.283 0.281 0.002	0.537 0.534 0.003



Усредненное по потоку сечение $\langle \sigma(E_{\gamma \max}) \rangle_m$ для образования ядра ${}^{93\text{m}}\text{Mo}$ на ${}^{\text{nat}}\text{Mo}$. Черная линия - расчет для вариантов LD1, GSF2, деленных на 6.5, коричневая линия – расчет LD6, GSF2, деленных на 4.3. Красные точки - экспериментальные данные [1].

[1] На природной смеси изотопов молибдена с помощью электронного пучка ускорителя ЛУЭ-40 были измерены усредненные по потоку сечения реакции ${}^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, xn){}^{93\text{m}}\text{Mo}$ при энергиях от 38 до 93 МэВ.

[2] Измерены выходы фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов молибдена при энергии 55.6 МэВ (НИИЯФ МГУ).

$$Y_{\text{exp}}({}^{93\text{m}}\text{Mo}) = (2.40 \pm 0.10) \cdot 10^{-9} \text{ e}^{-1}$$

$$Y_{\text{talys}}({}^{93\text{m}}\text{Mo}) = 4.17 \cdot 10^{-8} \text{ e}^{-1}$$

Наблюдается различие теоретических и экспериментальных данных в 17.4 раза.

Данная работа (55 МэВ):

$$\sigma_{q \text{ exp}}^{\text{prod}} = (3.58 \pm 0.10) \cdot 10^{-3} \text{ мб}$$

$$\sigma_{q \text{ TALYS}}^{\text{prod}} = 60.95 \cdot 10^{-3} \text{ мб}$$

Экспериментальное сечение на эквивалентный квант в 17 раз меньше расчетов по программе TALYS 2.0.

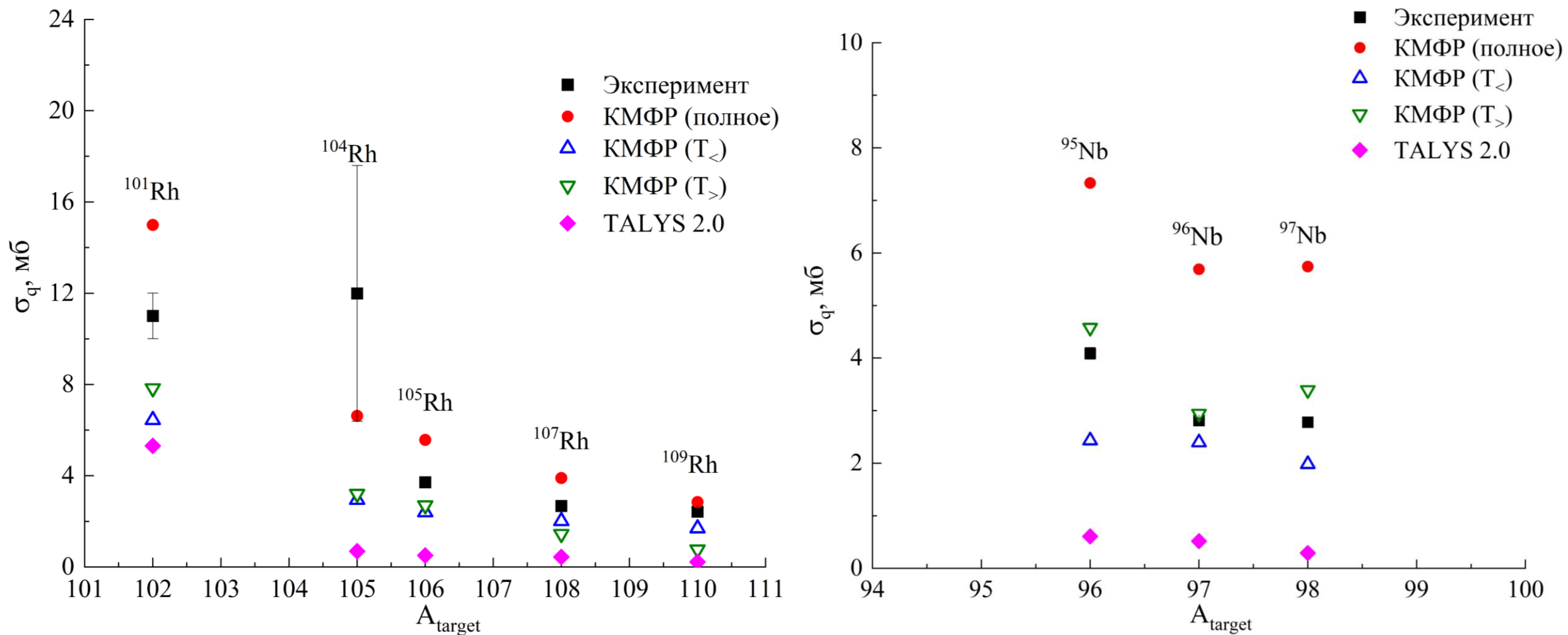
[1] I.S. Timchenko, O.S. Deiev, S.M. Olejnik et al. // Problems of Atomic Science and Technology, № 3 (2024).

[2] С.С. Бельшев, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов // Изв. РАН. Сер. физ. {bf 82}, № 6, 779–785 (2018).

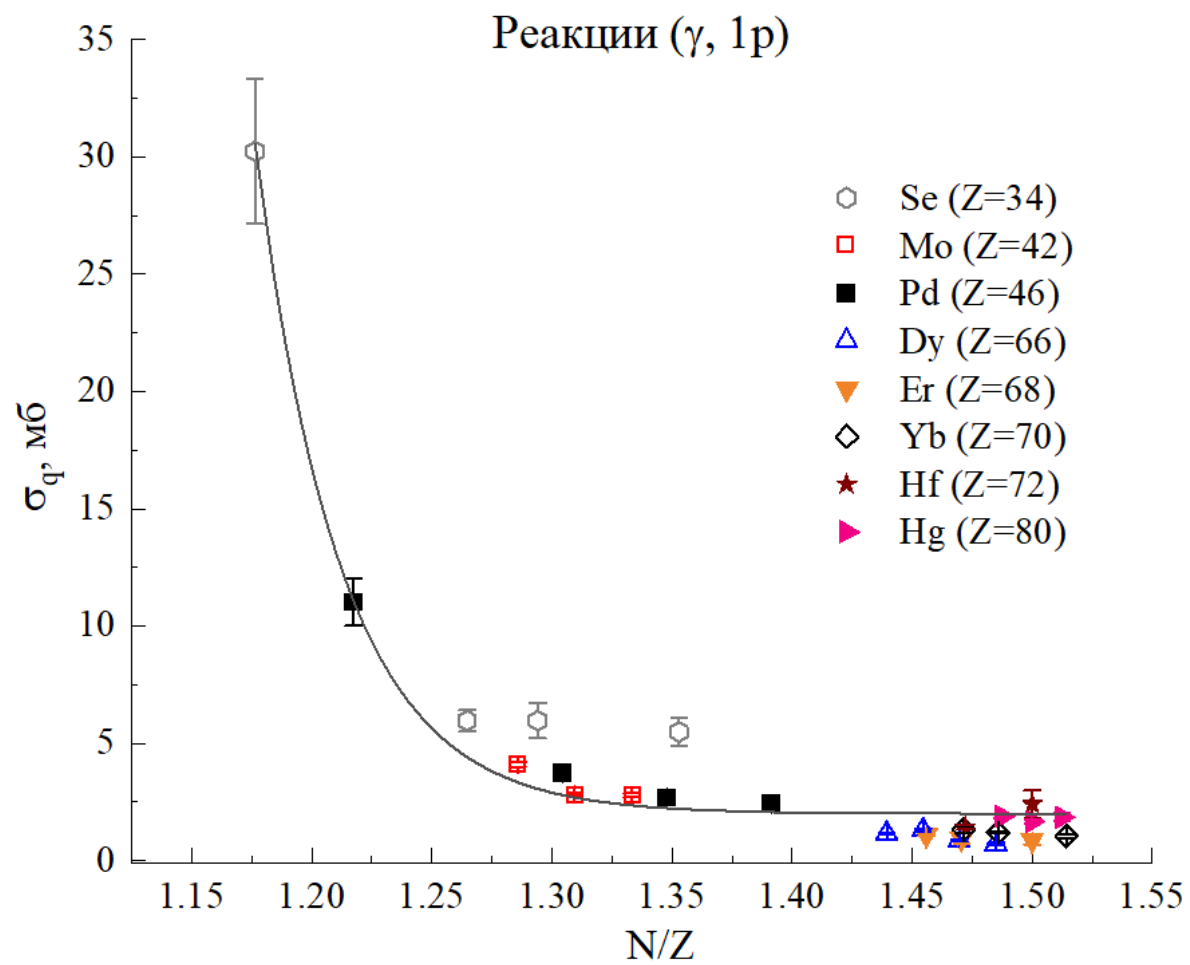
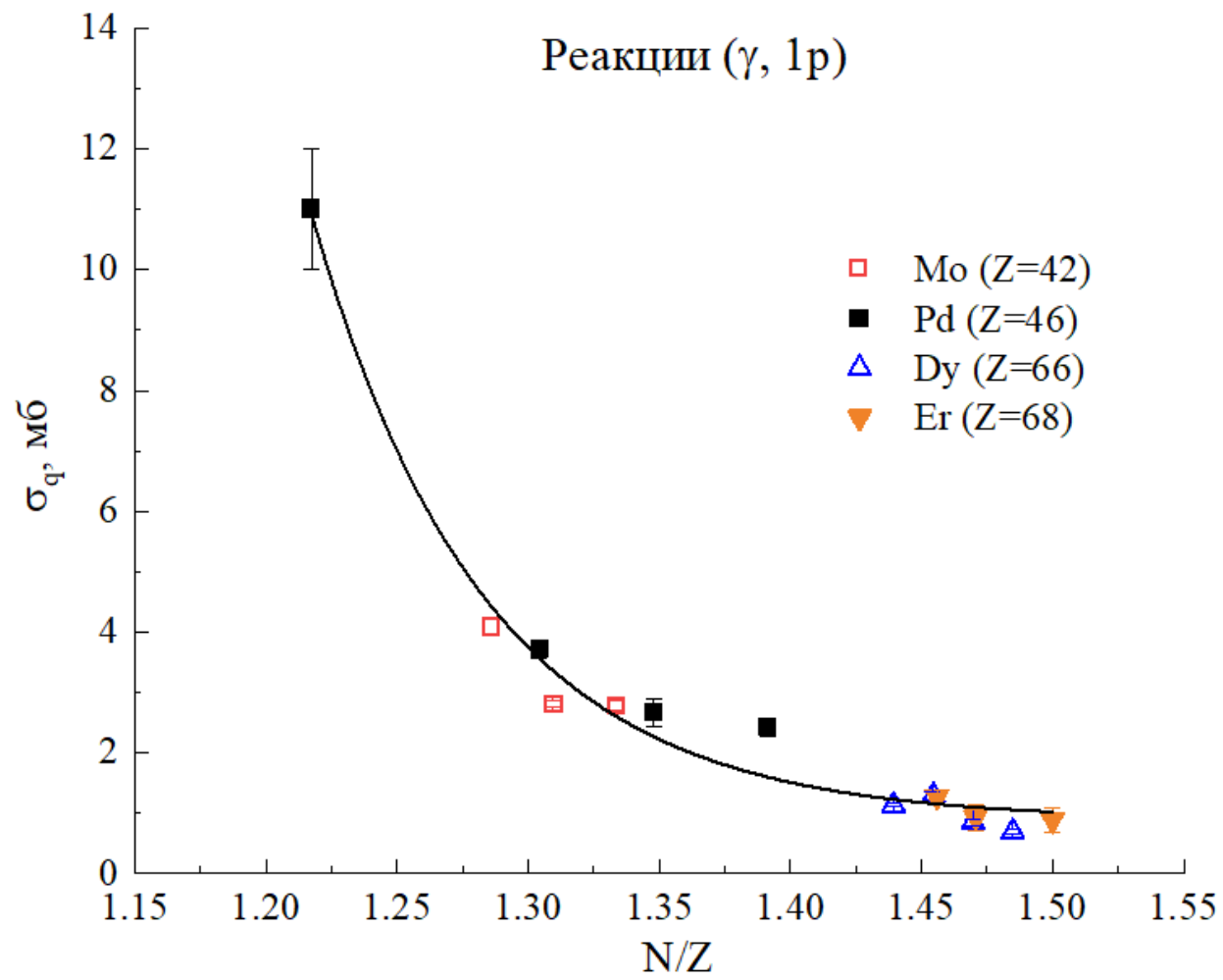
Сравнение экспериментальных сечений на эквивалентный квант для фотопротонных реакций на изотопах молибдена с расчетами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция получения изотопа	E_{thr} , МэВ	$\sigma_{q\,exp}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\,CMPR}^{prod}$, мб	$\sigma_{q\,TALYS}^{prod}$, мб
^{98m}Nb	51.1 мин.	$0.09744 \cdot ^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)$	18.10	$(17.56 \pm 0.37) \cdot 10^{-3}$		$18.92 \cdot 10^{-3}$
$^{97m+g}\text{Nb}$	g: 72.1 мин. (9/2 ⁺) m: 58.7 с. (1/2 ⁻)	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in1p)=$ $0.24292 \cdot ^{98}\text{Mo}(\gamma, 1p)+$ $0.09744 \cdot ^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n1p)$	9.80 24.01	0.686 ± 0.020	1.416 1.395 0.022	0.090 0.071 0.019
^{96}Nb	23.35 ч.	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in1p)=$ $0.09582 \cdot ^{97}\text{Mo}(\gamma, 1p)+$ $0.24292 \cdot ^{98}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)+$ $0.09744 \cdot ^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n1p)$	9.23 17.87 32.09	0.470 ± 0.007	0.748 0.343 0.401 0.005	0.149 0.050 0.094 0.005
$^{95m+g}\text{Nb}$	g: 34.99 дн. (9/2 ⁺) m: 3.61 дн. (1/2 ⁻)	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in1p)=$ $0.16673 \cdot ^{96}\text{Mo}(\gamma, 1p)+$ $0.09582 \cdot ^{97}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)+$ $0.24292 \cdot ^{98}\text{Mo}(\gamma, 2n1p)$	9.30 16.12 24.76	0.902 ± 0.025	1.617 1.222 0.343 0.051	0.215 0.101 0.056 0.057
^{92m}Nb	10.12 дн.	$^{nat}\text{Mo}(\gamma, in1p)=$ $0.09187 \cdot ^{94}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)+$ $0.15873 \cdot ^{95}\text{Mo}(\gamma, 2n1p)+$ $0.16673 \cdot ^{96}\text{Mo}(\gamma, 3n1p)$	17.46 24.83 33.98	0.159 ± 0.003		0.206 0.141 0.051 0.013

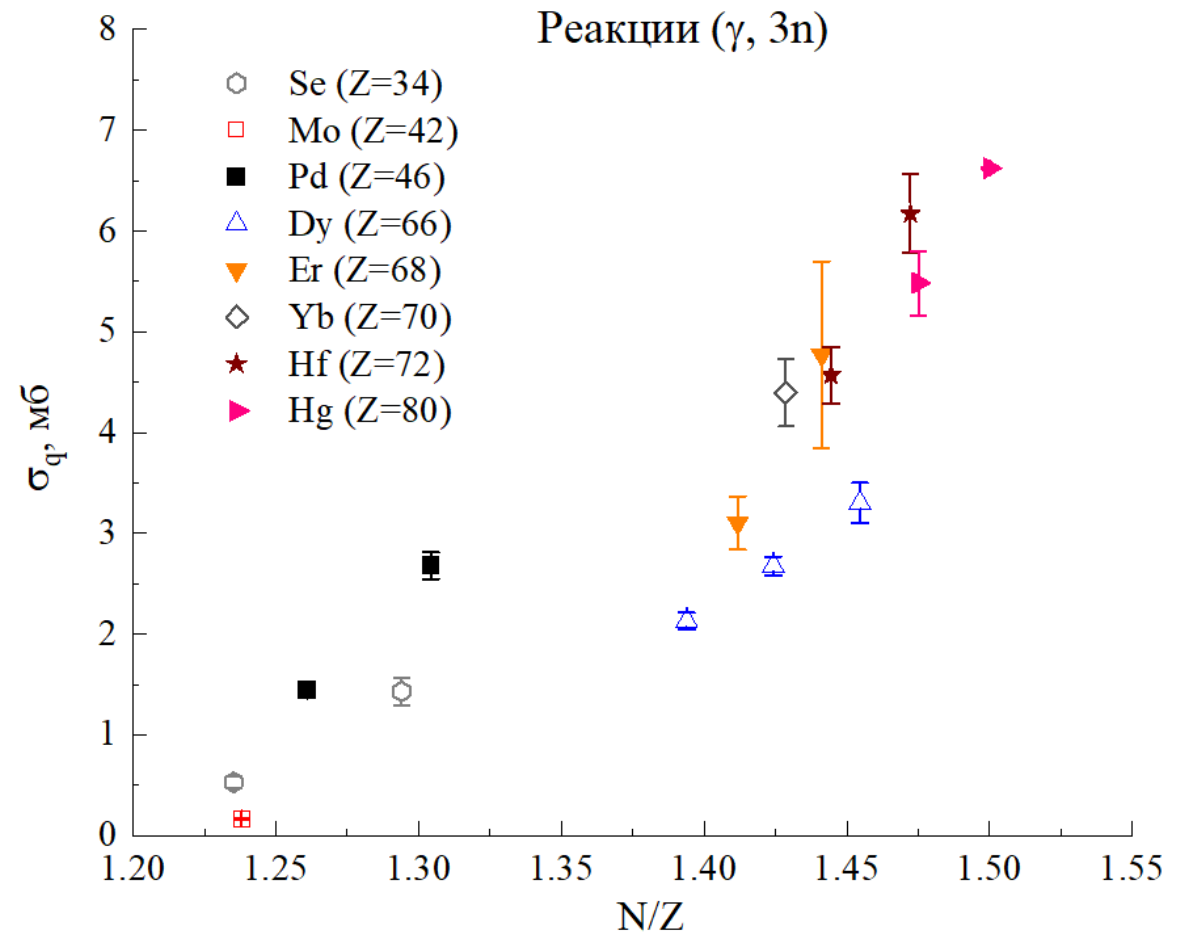
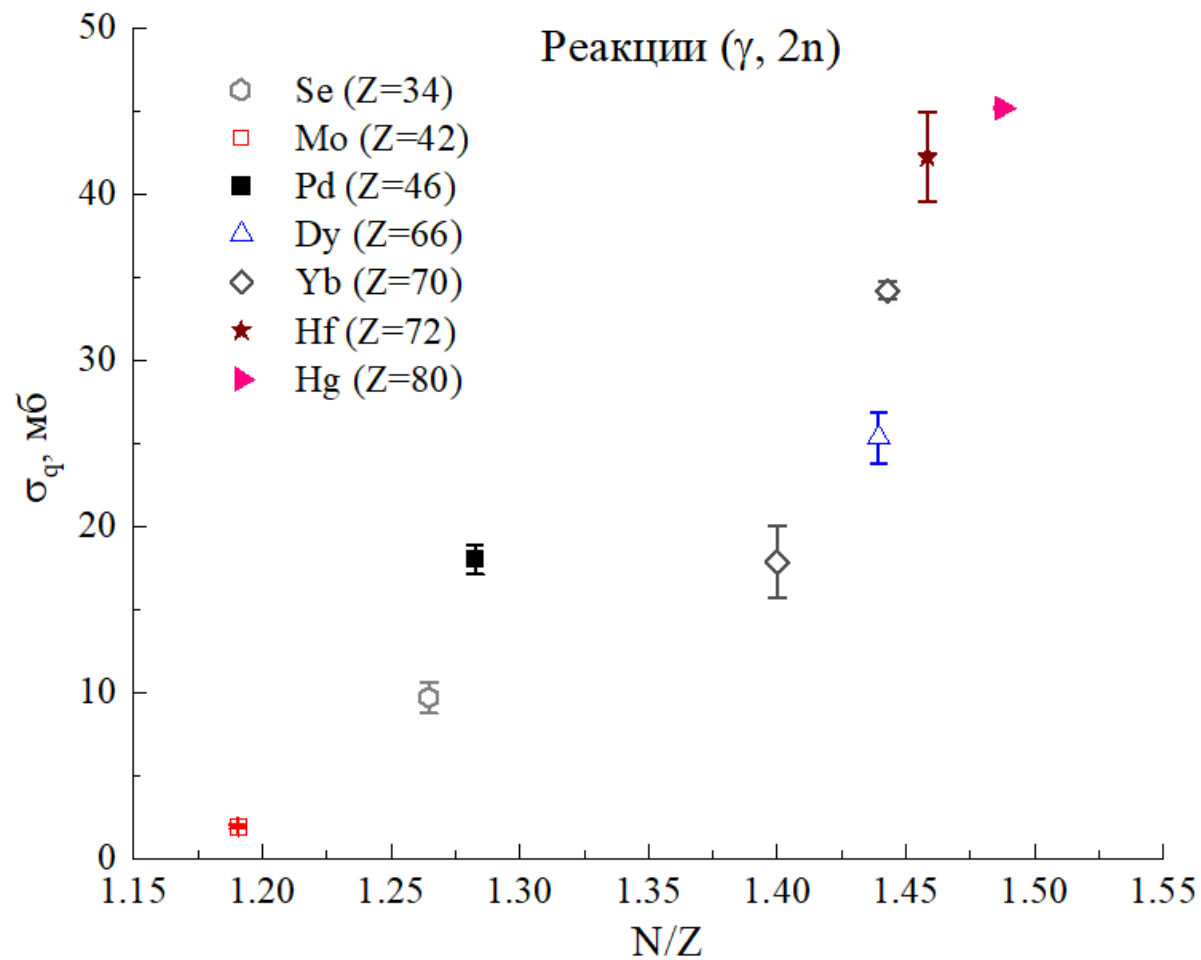
Экспериментальные и теоретические сечения на эквивалентный квант для $(\gamma, 1p)$ на стабильных изотопах палладия и молибдена



Зависимость сечений на эквивалентный квант для реакции $(\gamma, 1p)$ от отношения N/Z

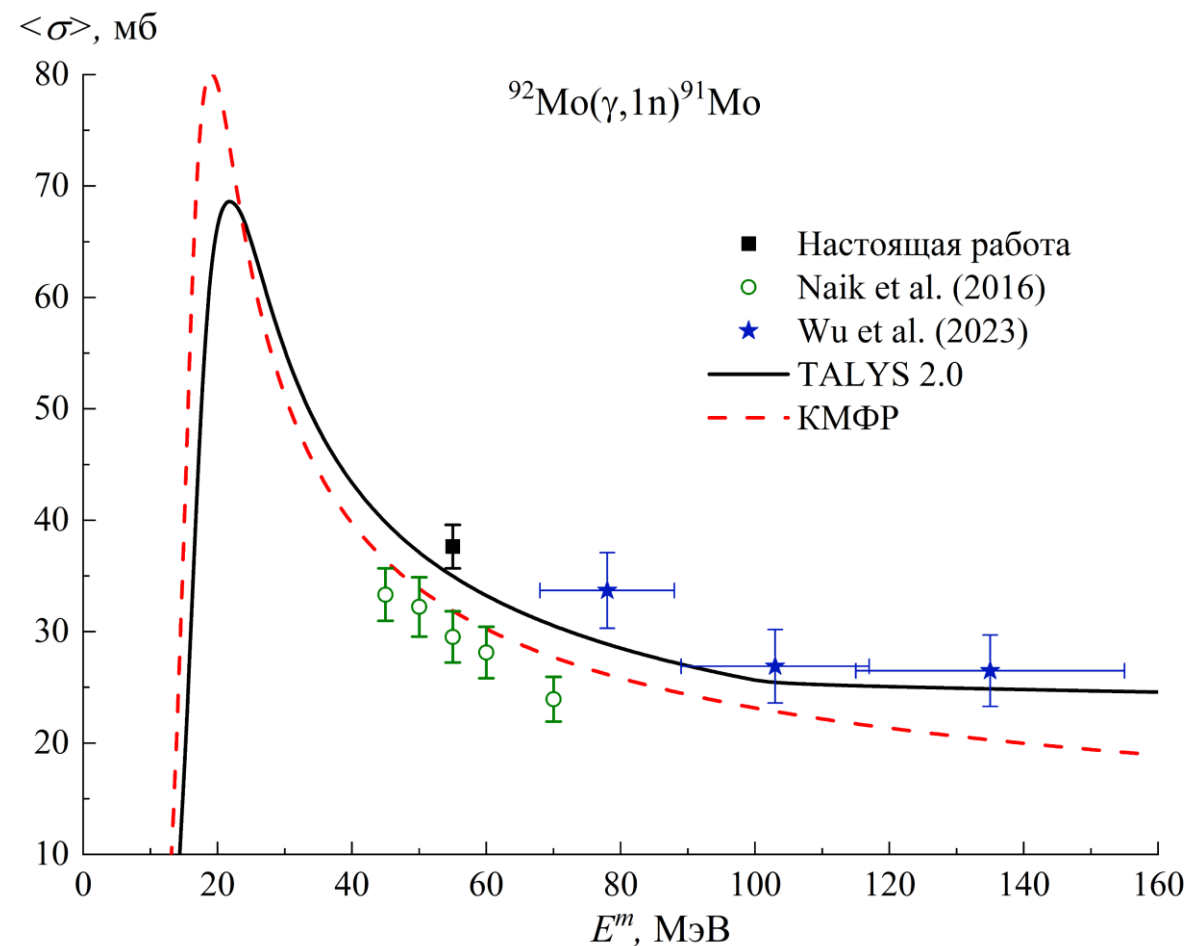
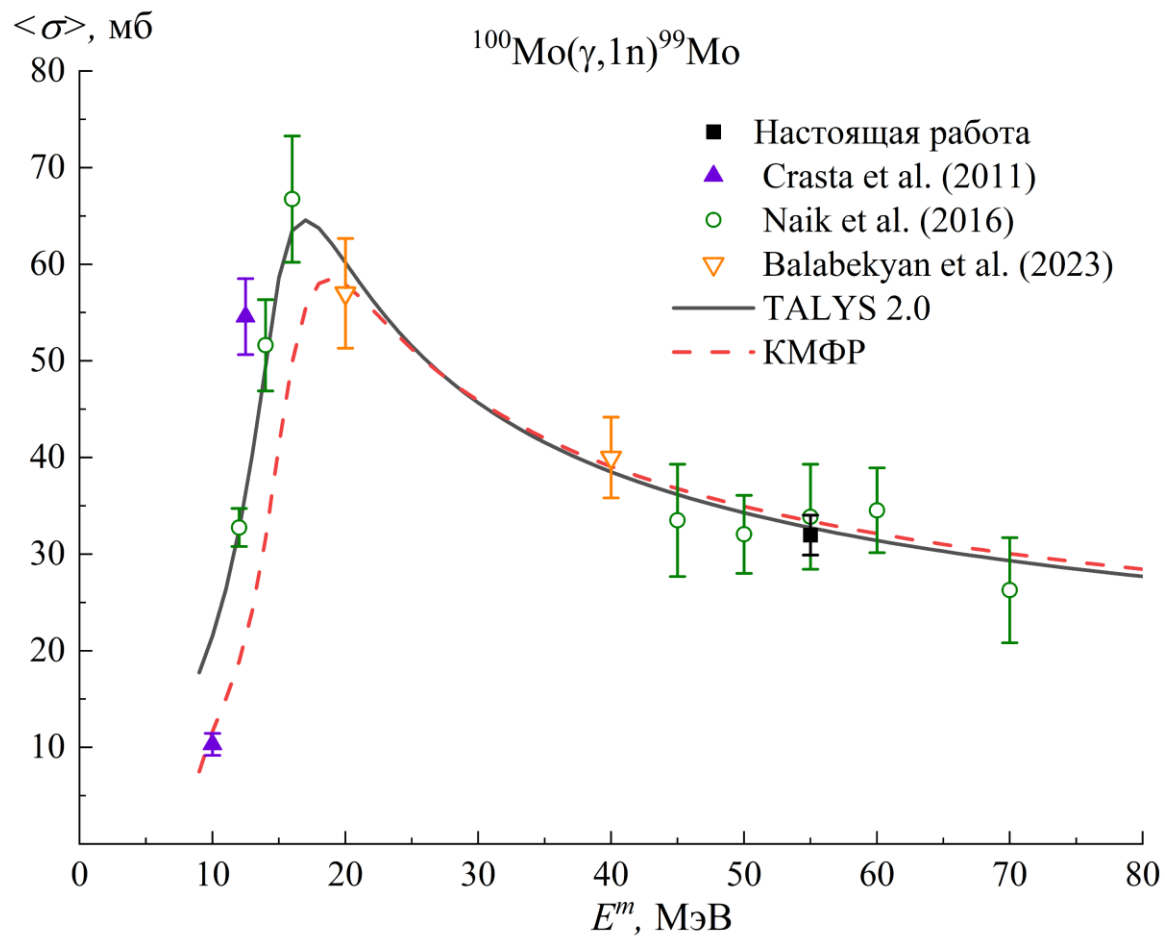


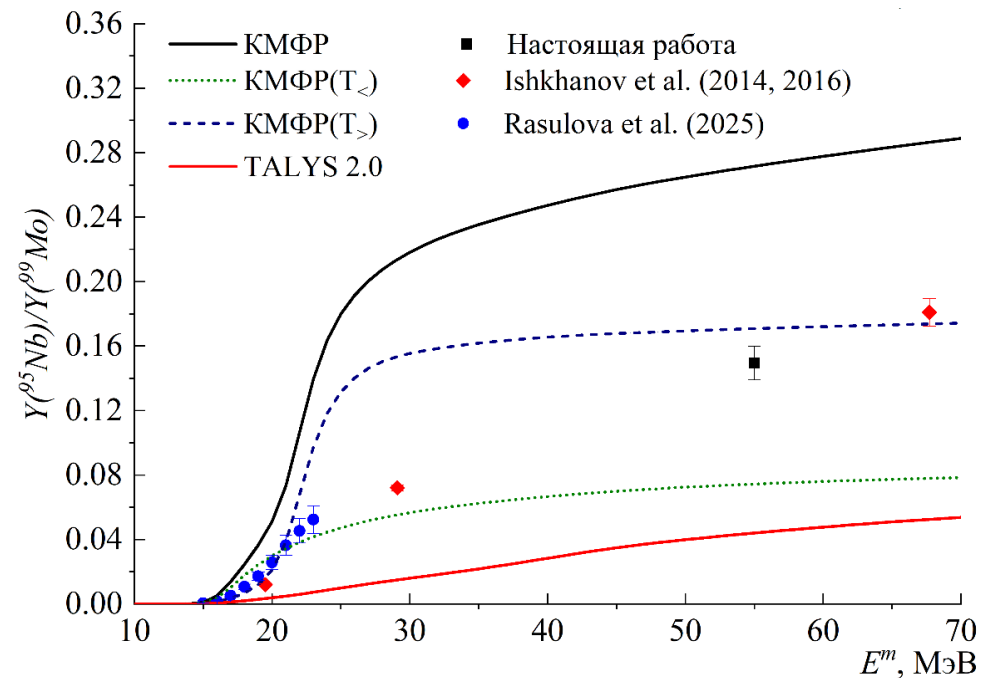
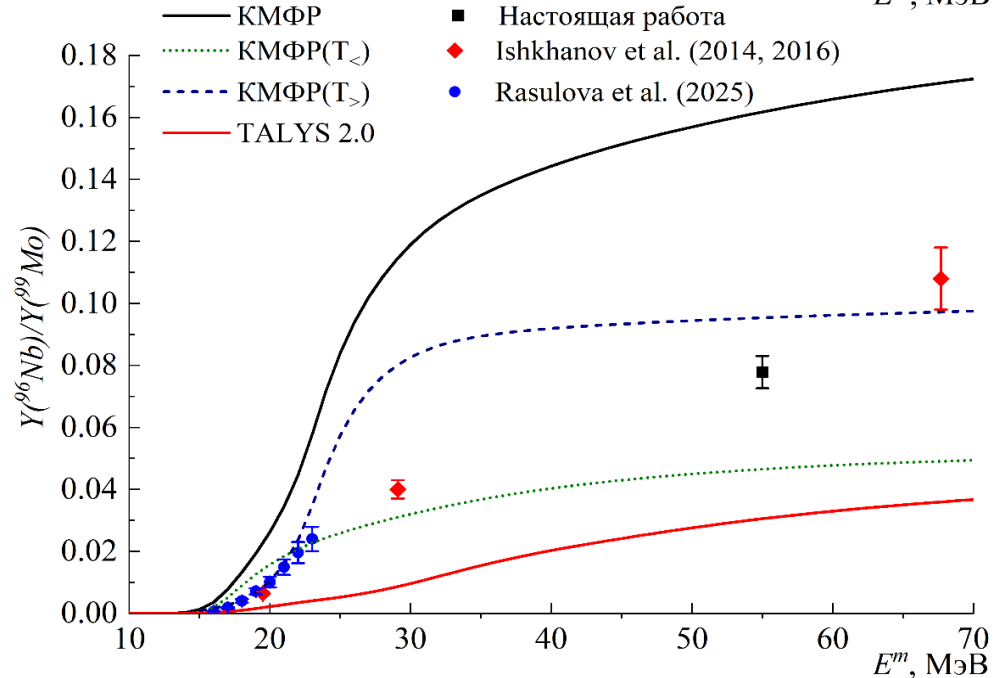
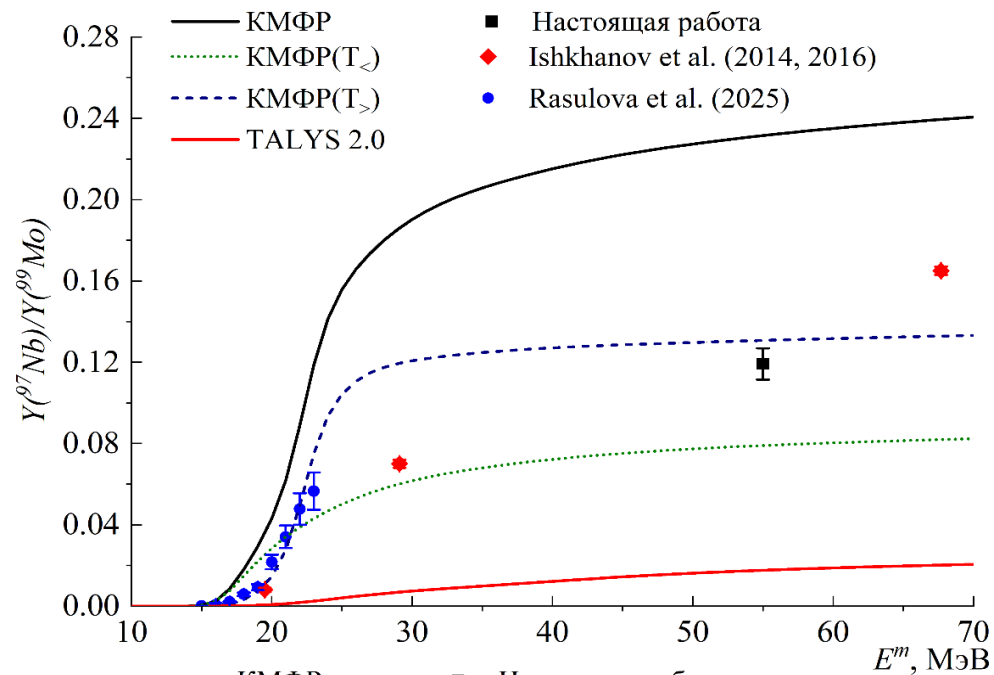
Зависимость сечений на эквивалентный квант для реакций $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ от отношения N/Z



Сравнение средних сечений для реакции $(\gamma, 1n)$ на самом лёгком и тяжёлом изотопах молибдена.

На рисунках представлены экспериментальные данные и результаты расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

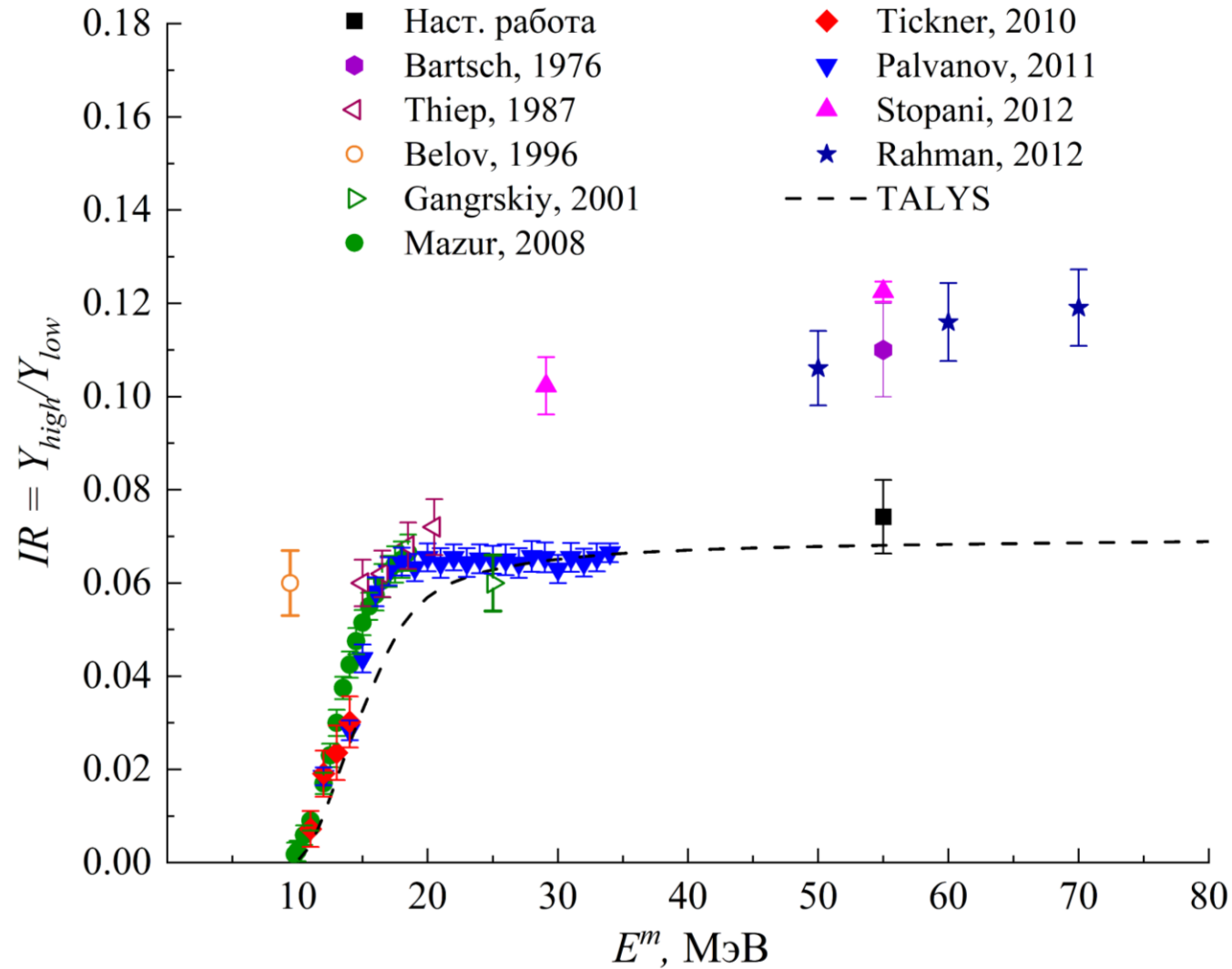




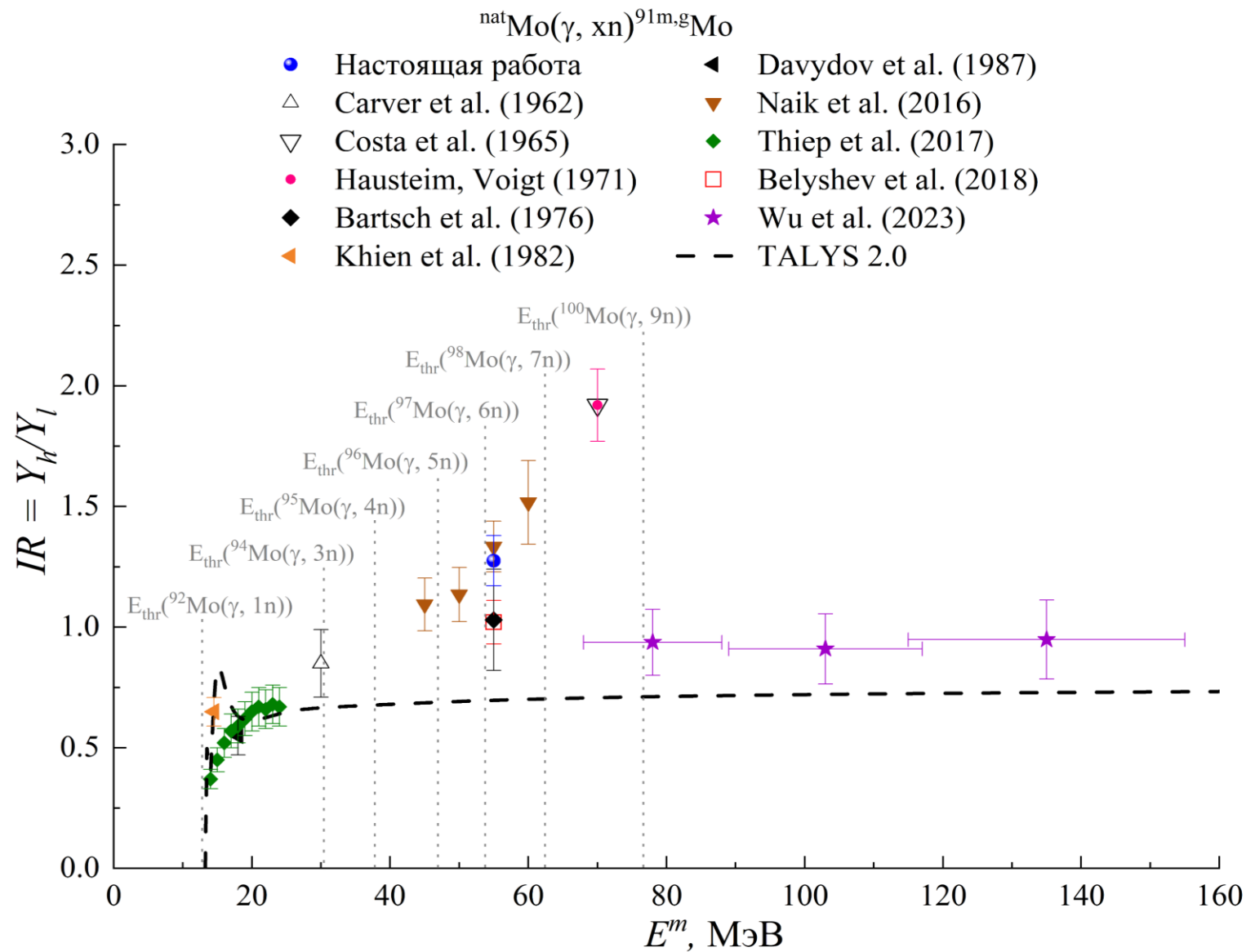
Сравнение экспериментальных относительных выходов образования $^{97,96,95}\text{Nb}$ с расчётами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0

Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А. // Ядерная физика 77, № 11, 1427–1435 (2014)
 Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, 35-43 (2014).
 Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кузнецов А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, 3–34 (2016).
 Rasulova F., Aksenov N., Alekseev S. // Physical Review C 111 (2025).

Изомерные отношения для изотопов, получаемых в результате фотонейтронных реакций

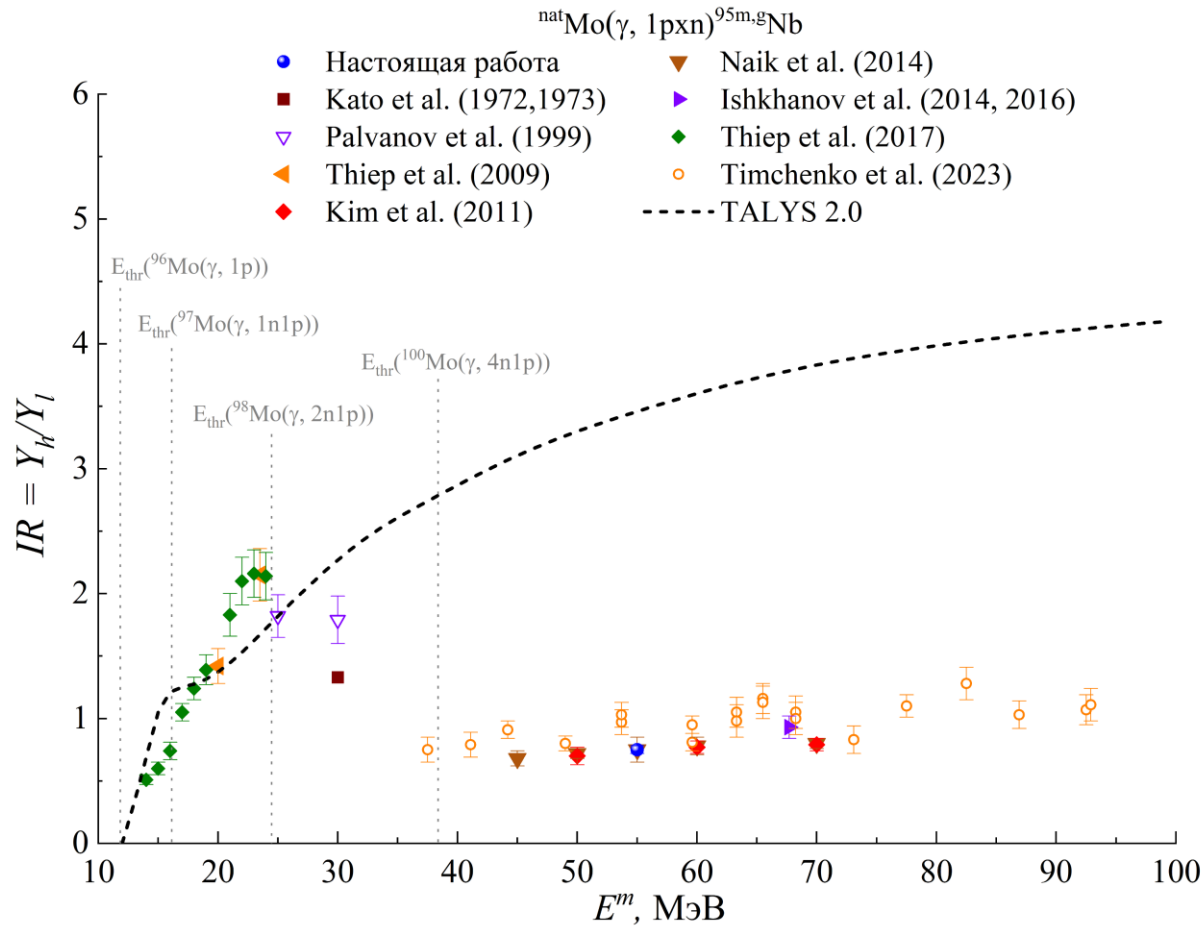


Сравнение изомерных отношений ^{109}Pd , полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0

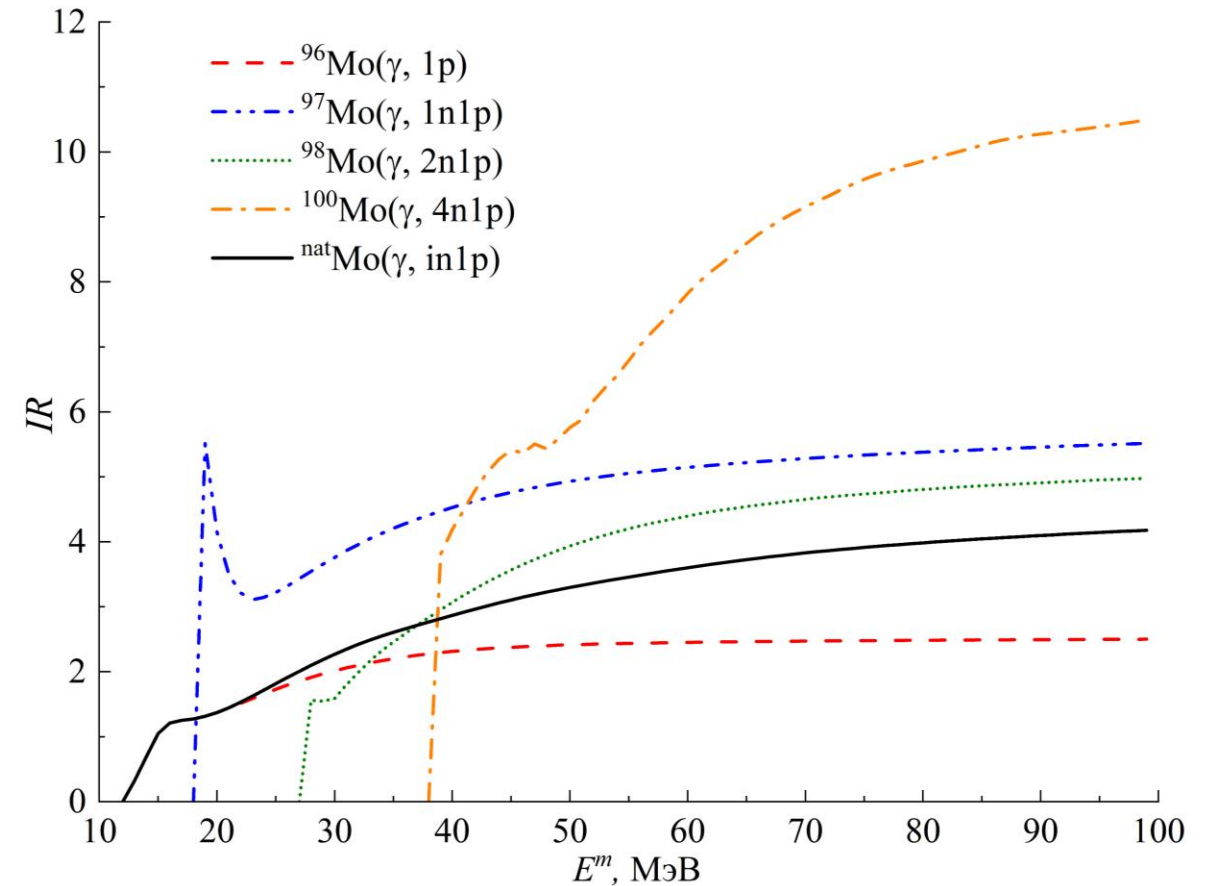


Сравнение изомерных отношений ${}^{91}\text{Mo}$, полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0

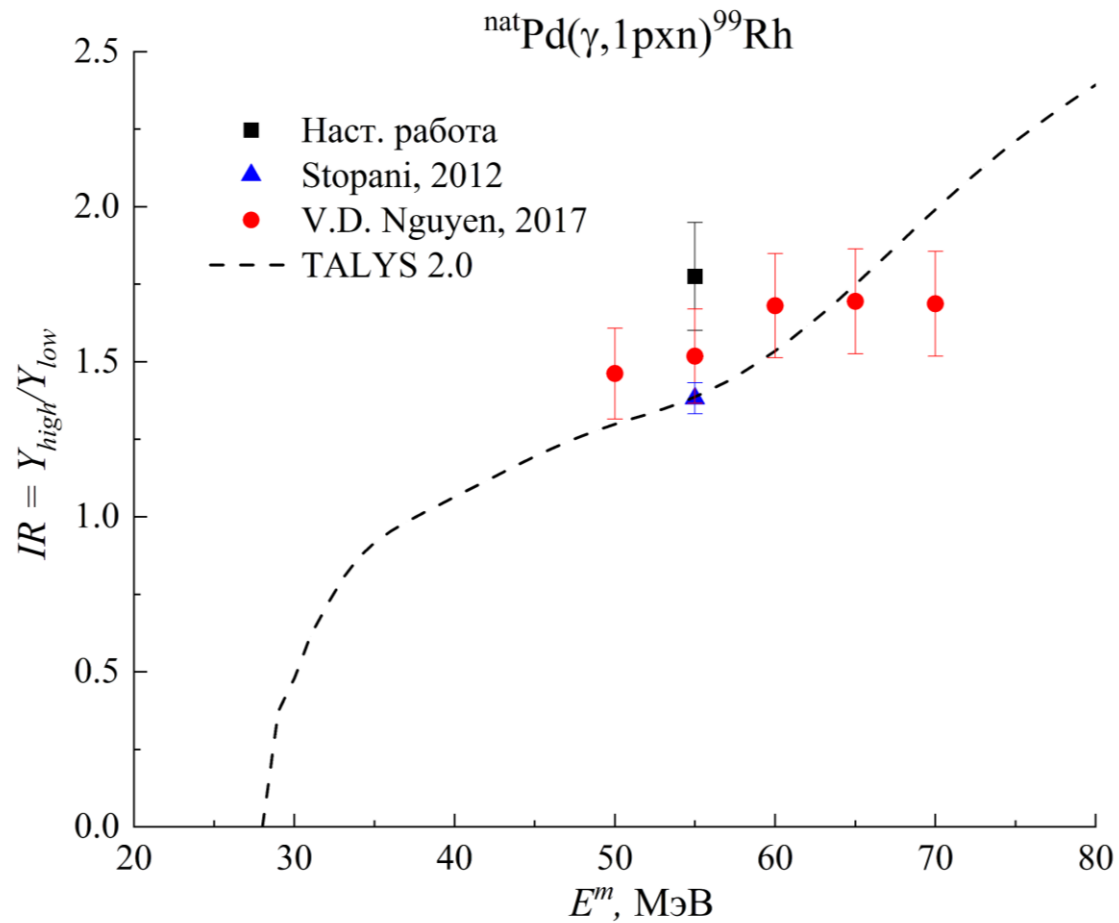
Изомерные отношения для изотопов, получаемых в результате фотопротонных реакций



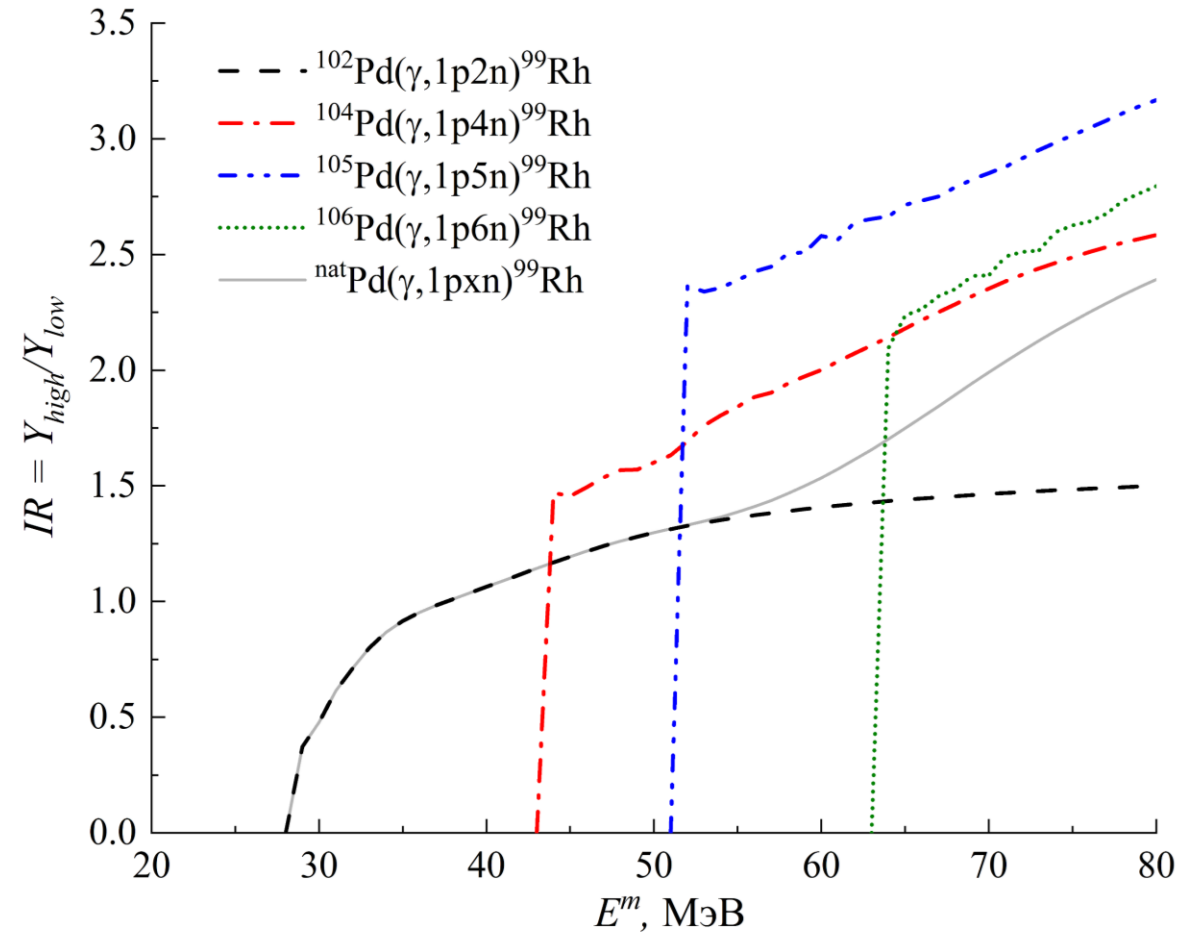
Сравнение изомерных отношений для ^{95}Nb , полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0



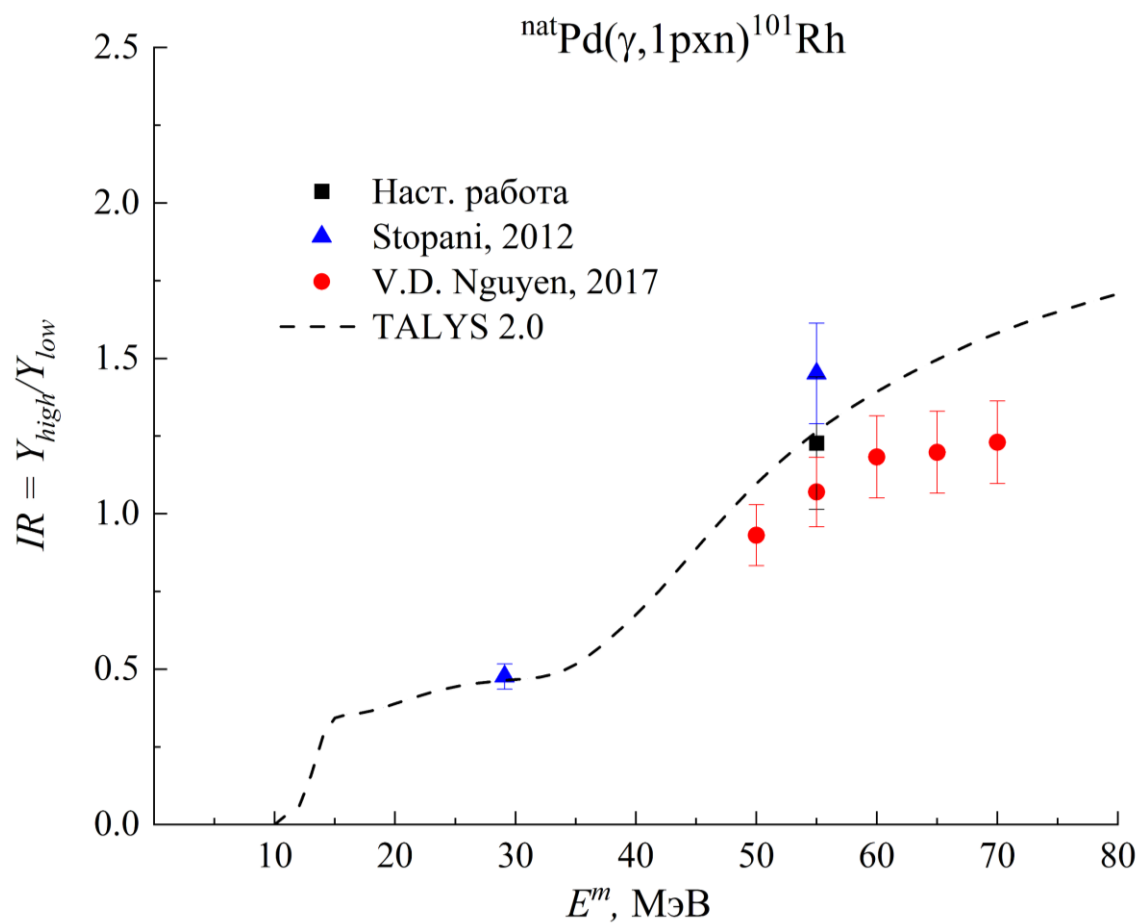
Теоретические изомерные отношения для образования ^{95}Nb на различных изотопах молибдена и ^{nat}Mo , рассчитанные по программе TALYS 2.0



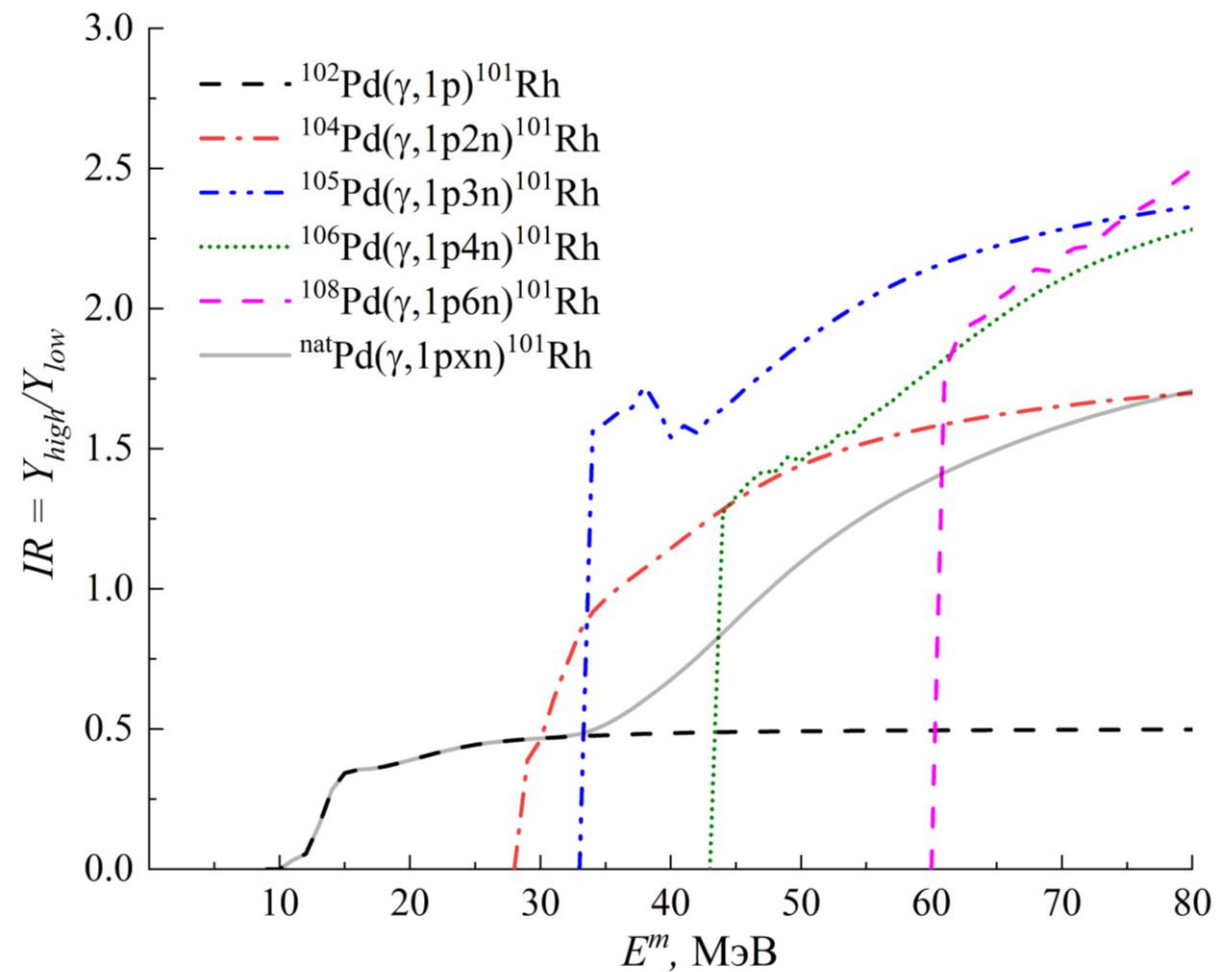
Сравнение изомерных отношений для ^{99}Rh , полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0



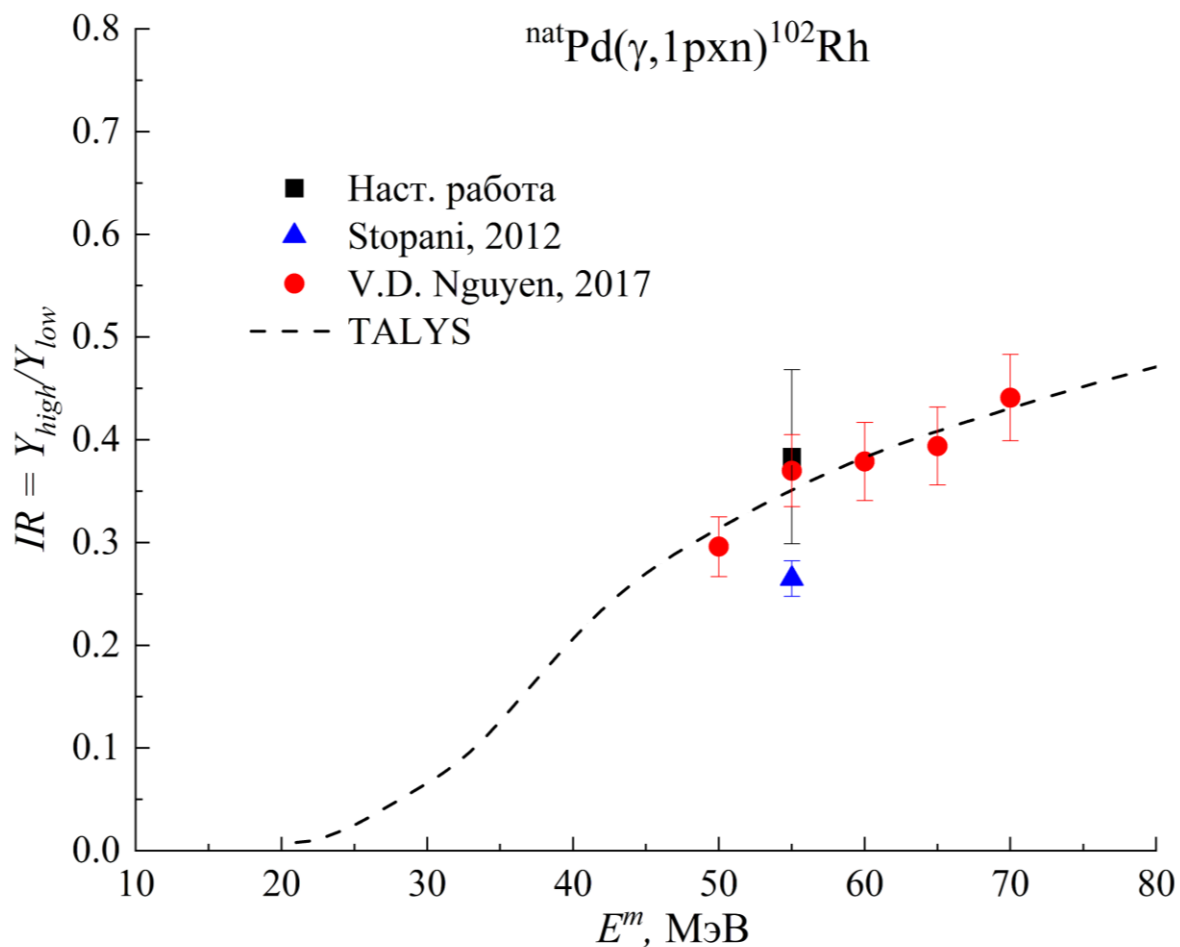
Теоретические изомерные отношения для образования ^{99}Rh на различных изотопах палладия и ^{nat}Pd , рассчитанные по программе TALYS 2.0



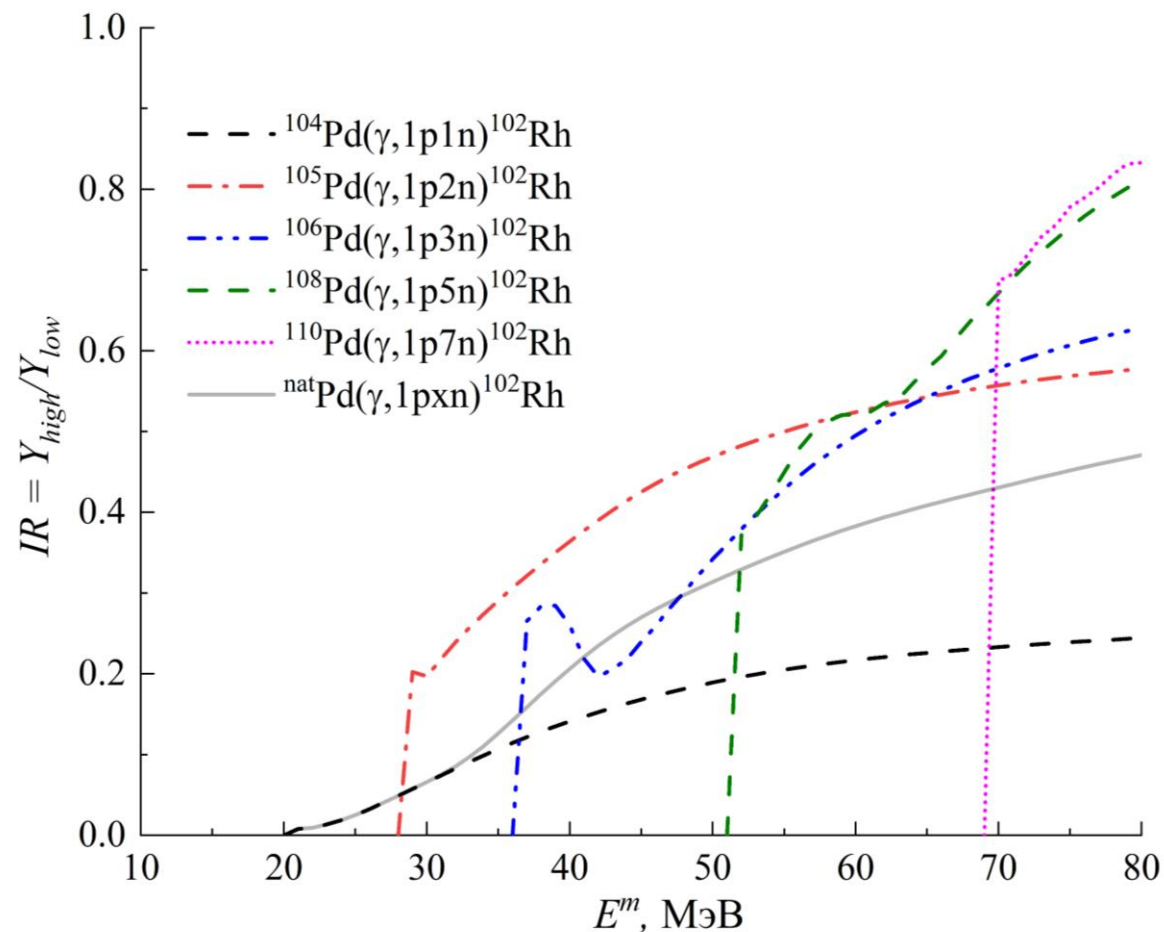
Сравнение изомерных отношений для ^{101}Rh , полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0



Теоретические изомерные отношения для образования ^{101}Rh на различных изотопах палладия и ^{nat}Pd , рассчитанные по программе TALYS 2.0



Сравнение изомерных отношений для ^{102}Rh , полученных в настоящей работе и других экспериментальных работах, с расчётами по программе TALYS 2.0



Теоретические изомерные отношения для образования ^{102}Rh на различных изотопах палладия и ^{nat}Pd , рассчитанные по программе TALYS 2.0

Обойдённые ядра

Реакция	Порог, МэВ	Эксперимент	КМФР	TALYS 2.0
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91\text{m}+\text{g}}\text{Mo}$	12.67	48.74 ± 2.52	49.36	52.96
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{90}\text{Mo}$	22.78	1.84 ± 0.10	1.92	3.64
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{91\text{m}+\text{g}}\text{Nb}$	7.46	29.84 ± 6.51	39.64	51.35
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 1n1p)^{90}\text{Nb}$	19.51	2.53 ± 0.15	2.45	4.99
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n1p)^{89}\text{Nb}$	29.61	0.73 ± 0.07	0.40	0.89
$^{92}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{89}\text{Mo}$	36.01		0.08	0.06
$^{92}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$		83.68 ± 6.98	93.83	113.89

	Правило сумм	КМФР
Интегральные сечения, мб·МэВ	1370	1519

^{88}Mo 8 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{89}Mo 2.04 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{90}Mo 5.56 h $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{91}Mo 15.49 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{92}Mo STABLE 14.649%	^{93}Mo 4000 y $\varepsilon=100\%$	^{94}Mo STABLE 9.187%
^{87}Nb 3.7 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{88}Nb 14.5 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{89}Nb 2.03 h $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{90}Nb 14.6 h $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{91}Nb 680 y $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{92}Nb $3.47\text{e}+7$ y $\varepsilon+\beta+=100\%$	^{93}Nb STABLE 100%

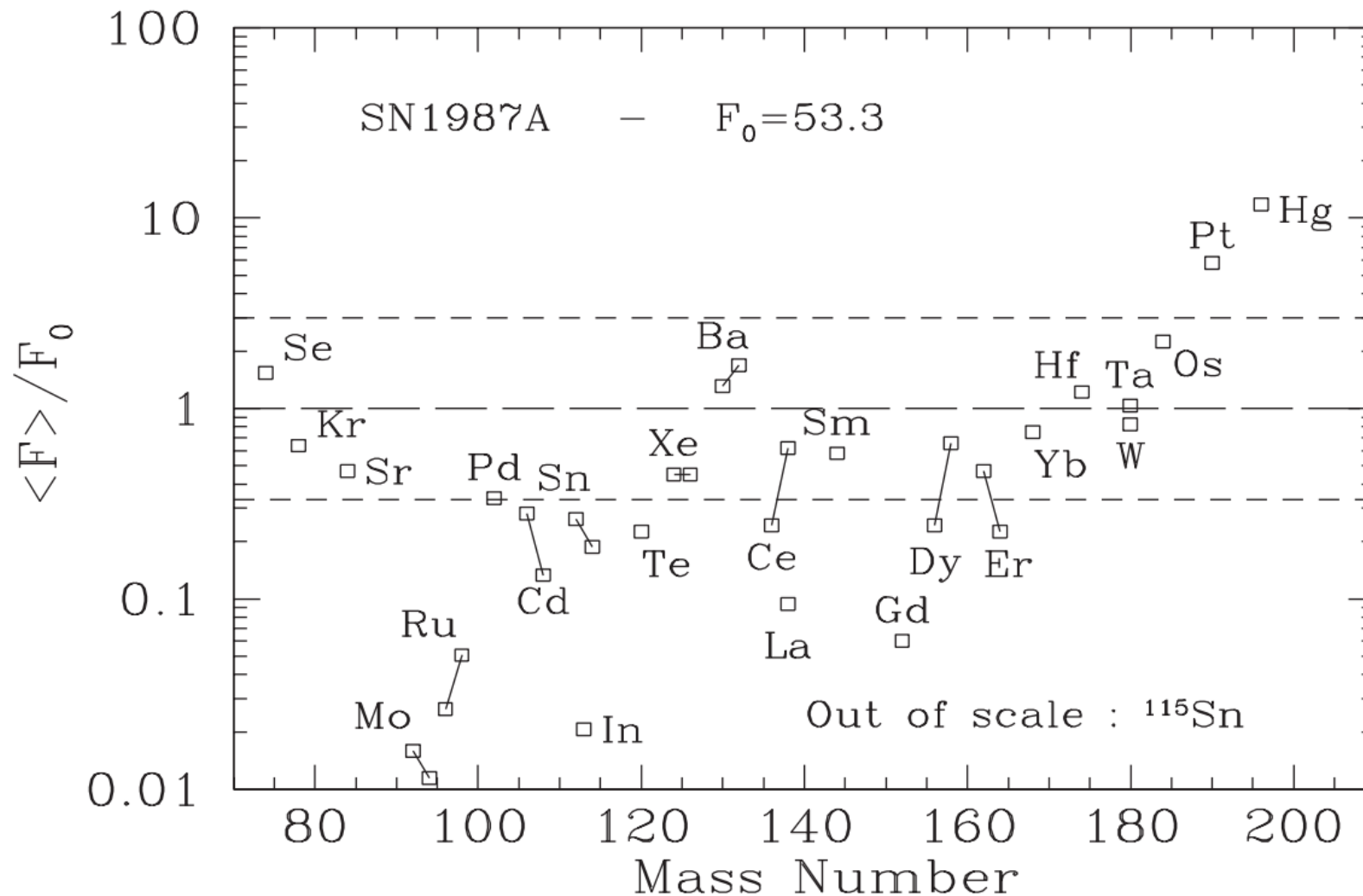
Обойдѣнные ядра

Реакция	Порог, МэВ	Эксперимент	КМФР	TALYS 2.0
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n)^{101}\text{Pd}$	10.57	64.77 ± 3.40	87.75	88.21
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n)^{100}\text{Pd}$	18.85	9.03 ± 0.65	8.92	11.41
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 3n)^{99}\text{Pd}$	29.96	0.58 ± 0.03	0.85	0.85
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1p)^{101}\text{Rh}$	7.81	10.94 ± 0.99	14.71	4.63
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 1n1p)^{100}\text{Rh}$	17.70	1.80 ± 0.25	3.61	2.33
$^{102}\text{Pd}(\gamma, 2n1p)^{99}\text{Rh}$	25.78	1.05 ± 0.06	1.33	1.30
$^{102}\text{Pd}(\gamma, \text{abs})$		88.18 ± 3.61	117.17	108.75

	Правило сумм	КМФР
Интегральные сечения, мб·МэВ	1515	2027

98Pd 17.7 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	99Pd 21.4 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	100Pd 3.63 d $\varepsilon=100\%$	101Pd 8.47 h $\varepsilon+\beta+=100\%$	102Pd STABLE 1.02%	103Pd 17 d $\varepsilon=100\%$	104Pd STABLE 11.14%	105Pd STABLE 22.33%
97Rh 30.8 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	98Rh 8.74 min $\varepsilon+\beta+=100\%$	99Rh 16.1 d $\varepsilon+\beta+=100\%$	100Rh 20.5 h $\varepsilon+\beta+=100\%$	101Rh 4.07 y $\varepsilon=100\%$	102Rh 207.3 d $\varepsilon+\beta+=78\%$ $\beta^-=22\%$	103Rh STABLE 100%	104Rh 42.3 s $\beta^-=99.55\%$ $\varepsilon+\beta+=0.45\%$

Рассчитанные на основе статистической модели распространённости обойдённых ядер, образовавшихся в результате взрыва сверхновой с массой равной 20-ти солнечным массам, нормированные на распространённость обойдённых ядер в солнечной системе



M. Arnould, S. Goriely, The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status. Physics Reports, 384. 2003. P. 1-84.

Медицинские изотопы

^{166}Ho представляет интерес для лучевой терапии. Комплекс ^{166}Ho -DOTMP применяется для разрушения миеломных клеток в костном мозге и паллиативного лечения костных метастазов. Микросферы ^{166}Ho также используются для лечения рака печени.

^{161}Tb по своим ядерным и химическим свойствам очень похож на ^{177}Lu (низкая энергия бета распада, период полураспада 6.9 дней). Однако ^{161}Tb излучает также большое количество конверсионных и оже-электронов, поэтому от его использования ожидается больший терапевтический эффект по сравнению с ^{177}Lu .

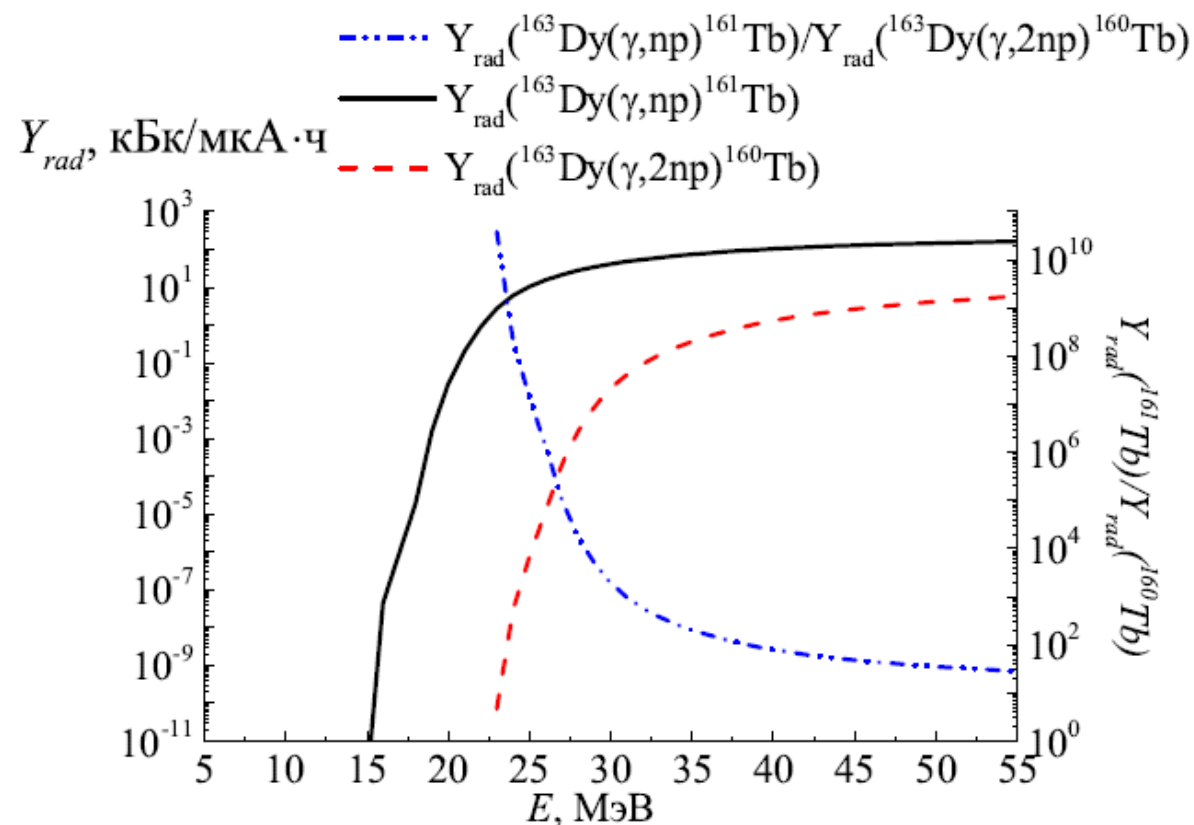
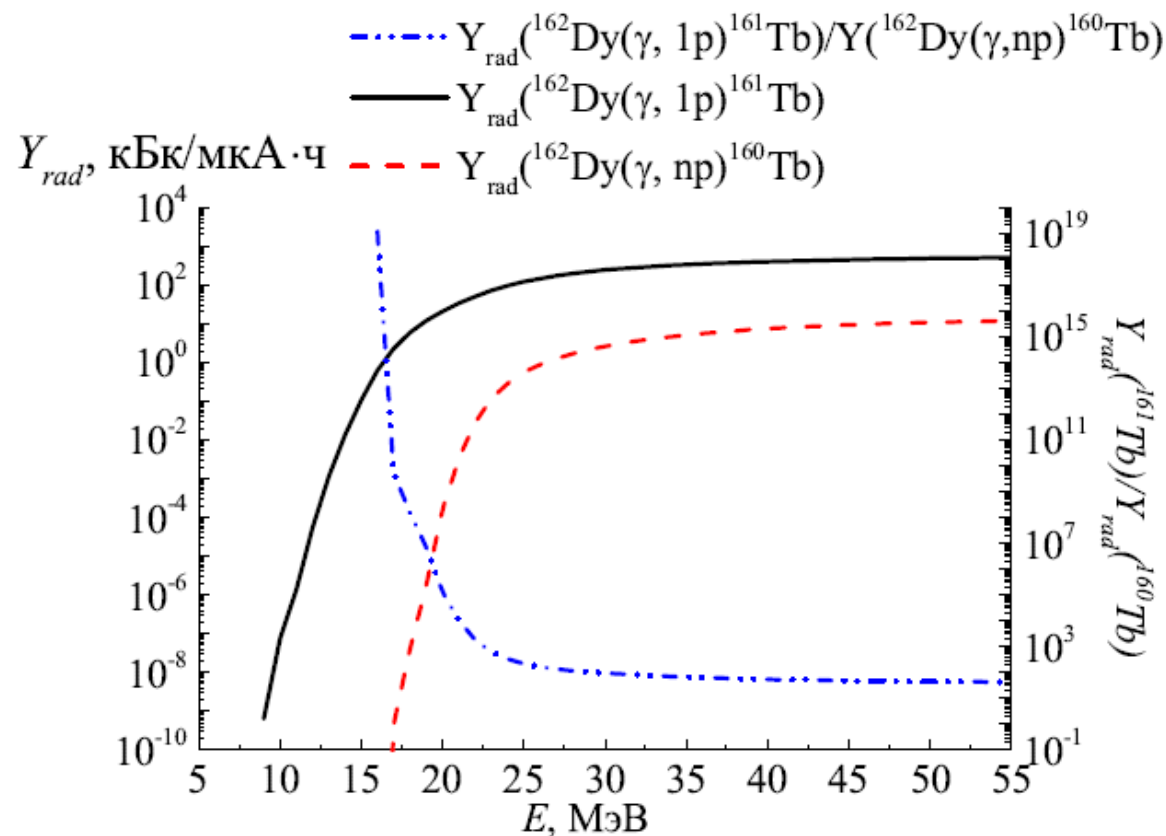
Радиохимические выходы, полученные при облучении естественной смеси изотопов эрбия на микротроне
РМ-55 НИИЯФ МГУ

Изотоп	$T_{1/2}$	$Y(E^m)_{\text{эксп}}, 1/e$	$Y(E^m)_{\text{КМФР}}, 1/e$	$Y(E^m)_{\text{радиоим}},$ кБк/(мкА·ч·г/см ²)
^{161}Er	3.21 ч.	$(6.45 \pm 0.55) \cdot 10^{-8}$	$9.85 \cdot 10^{-8}$	324 ± 27
^{163}Er	75 мин.	$(1.03 \pm 0.20) \cdot 10^{-6}$	$1.22 \cdot 10^{-6}$	$(13.3 \pm 2.6) \cdot 10^3$
^{169}Er	9.392 дн.	$(3.93 \pm 0.92) \cdot 10^{-6}$	$5.56 \cdot 10^{-6}$	281 ± 66
^{166}gHo	26.824 ч.	$(6.51 \pm 0.24) \cdot 10^{-8}$	$1.24 \cdot 10^{-7} *$	39.1 ± 1.5
^{167}Ho	2.98 ч.	$(5.53 \pm 1.28) \cdot 10^{-8}$	$1.28 \cdot 10^{-7}$	299 ± 69
^{169}Ho	4.72 мин.	$(2.77 \pm 0.64) \cdot 10^{-8}$	$5.26 \cdot 10^{-8}$	$(5.6 \pm 1.3) \cdot 10^3$

На основе экспериментальных данных получено, что при облучении обогащённой мишени из ^{167}Er (1 г/см²) на ускорителе электронов с током 1 мА в течение 24 часов можно наработать примерно 3 ГБк целевого ^{166}Ho .

Медицинские изотопы

Результаты расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций указывают на возможность использования для фотоядерного производства ^{161}Tb моноизотопной мишени из ^{162}Dy при энергиях электронного пучка 21-22 МэВ и моноизотопной мишени из ^{163}Dy при энергиях 29-30 МэВ.



Радиохимические выходы фотоядерных реакций на моноизотопах ^{162}Dy и ^{163}Dy , приводящих к образованию ^{160}Tb и ^{161}Tb , и отношения выходов при энергии пучка электронов от порога реакций до 55 МэВ

Заключение

Гамма-активационным методом проведены эксперименты по облучению мишеней естественного изотопного состава из эрбия, диспрозия, палладия и молибдена. Определены экспериментальные выходы и сечения на эквивалентный квант для фотопротонных и фотонейтронных реакций на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена.

Полученные экспериментальные данные указывают на уменьшения сечений фотопротонной реакции ($\gamma, 1p$) с ростом числа нейтронов в ядре внутри одного изотопного ряда, что объясняется увеличением порога данной реакции и ростом сечений конкурирующих каналов. Показана общая тенденция экспоненциального уменьшения сечения реакции ($\gamma, 1p$) с ростом отношения N/Z в области атомных масс от 74 до 201. Представлены общие тенденции увеличения сечений фотонейтронных реакций ($\gamma, 2n$), ($\gamma, 3n$) и уменьшения сечений реакции ($\gamma, 1n1p$) с ростом отношения N/Z .

Проведено сравнение полученных экспериментальных сечений на эквивалентный квант с результатами расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS 2.0. Показано, что для корректного описания образования лёгких изотопов эрбия и диспрозия необходим учёт многонуклонных реакций. Экспериментальные результаты для фотопротонных реакций лучше согласуются с расчётами, выполненными на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций, что указывает на необходимость учёта изоспинового расщепления ГДР, изовекторного квадрупольного резонанса, обертона ГДР. Показано, что влияние изоспинового расщепления изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса на сечения на эквивалентный квант уменьшается с ростом числа протонов в ядре.

Заключение

Экспериментально измерены средние сечения реакций $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{99}\text{Mo}$ и $^{102}\text{Mo}(\gamma, 1n)^{91}\text{Mo}$. Сравнение полученных результатов с теоретическими расчётами указывает на хорошее с комбинированной моделью фотонуклонных реакций и программой TALYS 2.0.

Получены экспериментальные значения изомерных отношений для ^{109}Pd , ^{102}Rh , ^{101}Rh , ^{99}Rh , ^{95}Nb , ^{91}Mo . Исследование изомерных отношений для фотопротонных и фотонейтронных реакций показывает необходимость учета многонуклонных реакций и порогового фактора.

Проведены исследования фотоядерных реакций, приводящих к распаду обойдённых ядер ^{92}Mo и ^{102}Pd . Показано, что основными каналами распада этих нейтронодефицитных ядер являются реакции $(\gamma, 1p)$ и $(\gamma, 1n)$. Из-за низкого порога реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)$ и $^{102}\text{Pd}(\gamma, 1p)$ для оценки скоростей распада данных обойдённых ядер во Вселенной необходимо правильно знать сечения фотопротонных реакций. Показано сильное завышение теоретических значений для реакции $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)$, что может служить причиной существенного занижения теоретических расчётов распространенности обойдённого ядра ^{92}Mo в результате нуклеосинтеза.

Получены радиохимические выходы реакций на естественной смеси изотопов эрбия и диспрозия. Показана возможность использования фотопротонных реакций на обогащённых мишенях из ^{162}Dy , ^{163}Dy и ^{167}Er для наработки ^{161}Tb и ^{166}Ho в количества, необходимых для доклинических испытаний. С учётом наличия побочных изотопов рассчитаны оптимальные энергии для наработки ^{161}Tb на мишенях ^{162}Dy и ^{163}Dy .

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проведённые измерения выходов и сечений фотоядерных реакций на естественной смеси изотопов эрбия, диспрозия, палладия и молибдена при максимальной энергии тормозного излучения 55 МэВ.
2. Измеренные экспериментальные данные для фотопротонных реакций позволяют сделать вывод об уменьшении сечений на эквивалентный квант для реакции $(\gamma, 1p)$ при увеличении атомной массы внутри одного изотопного ряда.
3. Сечения на эквивалентный квант для реакции $(\gamma, 1p)$ экспоненциально уменьшаются с ростом отношения N/Z в области атомных масс от 74 до 201.
4. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций и по программе TALYS указывает на необходимость учёта изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса для корректного описания фотопротонных реакций. Влияние изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса на выходы фотопротонных реакций уменьшается с ростом числа протонов в ядре.
5. Теоретические сечения на эквивалентный квант для реакции $^{92}\text{Mo}(\gamma, 1p)$ завышены по сравнению с экспериментальными данными, что может служить причиной существенного занижения теоретических расчётов распространенности обойдённого ядра ^{92}Mo в результате нуклеосинтеза.
6. Результаты расчётов на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций указывают на возможность использования для фотоядерного производства ^{161}Tb моноизотопной мишени из ^{162}Dy при энергиях электронного пучка 21-22 МэВ и моноизотопной мишени из ^{163}Dy при энергиях 29-30 МэВ.

Публикации

Основные результаты и методические основы работы, включенные в диссертацию, представлены в 5 статьях в реферируемых научных журналах, входящих в базы данных WoS, Scopus, RSCI и рекомендованных для защиты в ученых Советах МГУ и 10 тезисах конференций.

1. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А. Теоретические расчеты наработки ^{161}Tb на изотопах диспрозия. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия 80(4), 2025.
(Fursova, N.Y., Aliev, R.A., Belyshev, S.S. et al. Theoretical Calculations of ^{161}Tb Production on Dysprosium Isotopes. // Moscow University Physics Bulletin 80. 2025. № 8, pp. 698–706. <https://doi.org/10.3103/S0027134925700808>).
2. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Орлин В.Н., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Фоторасщепление изотопов палладия. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2020. № 6. СС. 3-27.
(Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A., Orlin V.N., Prosnyakov A.A., **Fursova N.Yu.**, Khankin V.V. Photodisintegration of Palladium Isotopes. // Moscow University Physics Bulletin, 2020, Vol. 75, pp.513–540. DOI: 10.3103/S0027134920060065).
3. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Исследование фотонейтронных реакций, приводящих к образованию и распаду изотопа ^{102}Pd . // Ядерная физика. 2020. Т. 83. №6. СС. 474-481.
(Belyshev S.S., Ishkhanov B.S., Kuznetsov A.A., Prosnyakov A.A., **Fursova N.J.**, Khankin V.V. Investigation of Photoneutron Reactions Leading to the Production and Decay of the Isotope ^{102}Pd . // Physics of Atomic Nuclei. 2020. Vol. 83. pp.787–795. DOI: 10.1134/S1063778820050075).
4. Poriadina O.V., Belyshev S.S., **Fursova N.Yu.**, Khankin V.V., Kuznetsov A.A. Photonuclear reactions on mercury isotopes. // Nuclear Physics A 1063, 123206, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2025.123206>.
5. Rasulova F.A., **Fursova N.Yu.**, Kuznetsov A.A. et al. Photonuclear reactions on stable isotopes of molybdenum at bremsstrahlung endpoint energies of 10–23 MeV // Physical Review C. 2025. 111 (2). PP. 1-16. DOI: 10.1103/PhysRevC.111.024604

6. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В. Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на средних и тяжелых ядрах гамма-активационным методом // IV Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике. Тезисы. Место издания: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". С. 43-44, 2025.
7. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В. Фотоядерные реакции на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена // LXXV Международная Конференция «ЯДРО – 2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» (Санкт-Петербург, Россия, 1-6 июля 2025). Сборник тезисов. Место издания: Санкт-Петербург. С. 86-87, 2025.
8. **Фурсова Н.Ю.**, Нарabотка медицинских изотопов на ускорителях электронов // III Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике. Место издания ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2024. Саров, тезисы. С. 37-38.
9. **Fursova N.Yu.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Priselkova A.B., Khankin V.V. Photoproton reactions on erbium isotopes // LXXIV International Conference «Nucleus-2024: Fundamental problems and applications». JINR Dubna. 2024. Dubna, abstracts. PP. 187-188.
10. **Fursova N.J.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Khankin V.V. Photonuclear method of ^{161}Tb . // LXXII International conference «NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications». 2022. Moscow, abstracts. P. 392.
11. **Fursova N.**, Belyshev S., Ishkhanov B., Kuznetsov A., Prosnyakov A., Orlin V., Khankin V. Photonuclear reactions on $^{102,104}\text{Pd}$ // LXX International conference «NUCLEUS–2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies». 2020. Saint-Petersburg, abstracts. PP. 284-285.
12. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Орлин В.Н., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Фоторасщепление изотопов палладия //Труды XX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Место издания КДУ, "Университетская книга". 2019. Москва, тезисы. С. 171-175.
13. Кузнецов А.А., Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Фоторасщепление легких изотопов $^{102,104}\text{Pd}$ // Труды XIX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Место издания КДУ, "Университетская книга" Москва, 2018. Москва, тезисы. С. 149-150.

14. Kuznetsov A.A., Belyshev S.S., Ishkanov B.S., **Fursova N.J.**, Khankin V.V. Photonuclear reactions on palladium isotopes. // LXVIII international conference NUCLEUS-2018 «Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies». 2018. Voronezh, abstracts. PP. 54-54.
15. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В. Фотоядерные реакции на изотопах палладия. // Труды XVIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Место издания: КДУ, Университетская книга. 2017. Москва, тезисы. С. 138-141.

Научные результаты и положения диссертации докладывались автором и в соавторстве с ним на международных и всероссийских научных школах и конференциях:

1. **Фурсова Н.Ю.**, Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В., Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на импульсном разрезном микротроне РМ-55 НИИЯФ МГУ, Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова, Москва, Россия, 23 октября 2025, устный доклад;
2. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В., Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на средних и тяжёлых ядрах гамма-активационным методом, IV Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике, Саров, Россия, 28 июля - 1 августа 2025, устный (30 июля) и стендовый (31 июля) доклады;
3. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Порядина О.В., Ханкин В.В., Фотоядерные реакции на стабильных изотопах эрбия, диспрозия, палладия и молибдена, LXXV Международная Конференция «ЯДРО – 2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц Ядерно-физические технологии», Санкт-Петербург, Россия, 1-6 июля 2025, устный доклад;
4. **Фурсова Н.Ю.**, Исследование фотопротонных реакций на изотопах молибдена, Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025», Москва, Россия, 11 - 25 апреля 2025, устный доклад;
5. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Ханкин В.В., Исследование фотоядерных реакций на изотопах диспрозия, Научная конференция «Ломоносовские чтения», Москва, Россия, 24 марта - 3 апреля 2025, устный доклад;
6. **Фурсова Н.Ю.**, Многоуклонные реакции на средних и тяжелых ядрах, Научный семинар ОЭПВАЯ и кафедры общей ядерной физики, Москва, Россия, 14 ноября 2024, устный доклад;

7. **Fursova N.Yu.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Khankin V.V., Kuznetsov A.A., Priselkova A.B., Photonuclear production of the medical isotopes ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{161}Tb , ^{166}Ho and ^{177}Lu , 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), Дубна, Россия, 27 октября – 1 ноября 2024, устный доклад;
8. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Ханкин В.В., Ядерные данные для производства медицинских изотопов на ускорителях электронов, Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова, Москва, Россия, 24 октября 2024, устный доклад;
9. **Фурсова Н.Ю.**, Нарботка медицинских изотопов на ускорителях электронов, III Всероссийская школа по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике, Саров, Россия, 22 – 26 июля 2024, устный и стендовый доклад;
10. **Fursova N.Yu.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Priselkova A.B., Khankin V.V., Photoproton reactions on erbium isotopes, LXXIV International conference «Nucleus- 2024: Fundamental problems and applications», Дубна, Россия, 1-5 июля 2024;
11. **Фурсова Н.Ю.**, Алиев Р.А., Бельшев С.С., Кузнецов А.А., Приселкова А.Б., Ханкин В.В., Исследование фотоядерных реакций на изотопах эрбия, 73- я международная конференция по ядерной физике «ЯДРО-2023: Фундаментальные вопросы и приложения», Саров, Россия, 9 – 13 октября 2023, устный доклад;
12. **Фурсова Н.Ю.**, Бельшев С.С., Варламов В.В., Дружинина А.В., Кузнецов А.А., Ханкин В.В., Фотоядерные реакции на мониторинговых мишенях ^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$, ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{181}Ta , ^{197}Au , XXIV Харитоновские тематические научные чтения «Проблемы ускорительной физики и физики высоких энергий», Саров, Россия, 24 – 28 июля 2023, устный доклад;
13. **Fursova N.J.**, Aliev R.A., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A., Khankin V.V., Photonuclear method of ^{161}Tb production, LXXII International conference «Nucleus-2022: Fundamental problems and applications», Москва, Россия, 11 – 16 июля 2022, устный доклад;
14. **Fursova N.**, Belyshev S., Ishkhanov B., Kuznetsov A., Prosnyakov A., Orlin V., Khankin V., Photonuclear reactions on $^{102,104}\text{Pd}$., LXX International conference «NUCLEUS-2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies», Санкт-Петербург, Россия, 11-17 октября 2020, стендовый доклад;
15. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Орлин В.Н., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В., Фоторасщепление изотопов палладия, XX Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, Россия, 25 -26 ноября 2019, устный доклад;
16. Просняков А.А., Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., Качалова Д.И., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В., Фотоядерные реакции на изотопах палладия, Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2019», секция Ядерная физика, Москва, Россия, 15 – 25 апреля 2019, устный доклад;

17. Кузнецов А.А., Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Просняков А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В., Фоторасщепление лёгких изотопов $^{102,104}\text{Pd}$, XIX Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, Россия, 26 – 27 ноября 2018, устный доклад;
18. Belyshev S.S., Ishkanov B.S., **Fursova N.J.**, Khankin V.V., Kuznetsov A.A., Photonuclear reactions on palladium isotopes, LXVIII international conference «NUCLEUS-2018: Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies», Воронеж, Россия, 1 – 6 июля 2018, устный доклад;
19. Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Кузнецов А.А., **Фурсова Н.Ю.**, Ханкин В.В., Фотоядерные реакции на изотопах палладия, XVIII Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, Россия, 4 – 5 декабря 2017, устный доклад.

Спасибо за внимание!