

Изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса на средних и тяжелых ядрах

Докладчик:

Расулова Ф.А.
научный сотрудник

Санкт-Петербург-2025

Гигантский дипольный резонанс атомных ядер

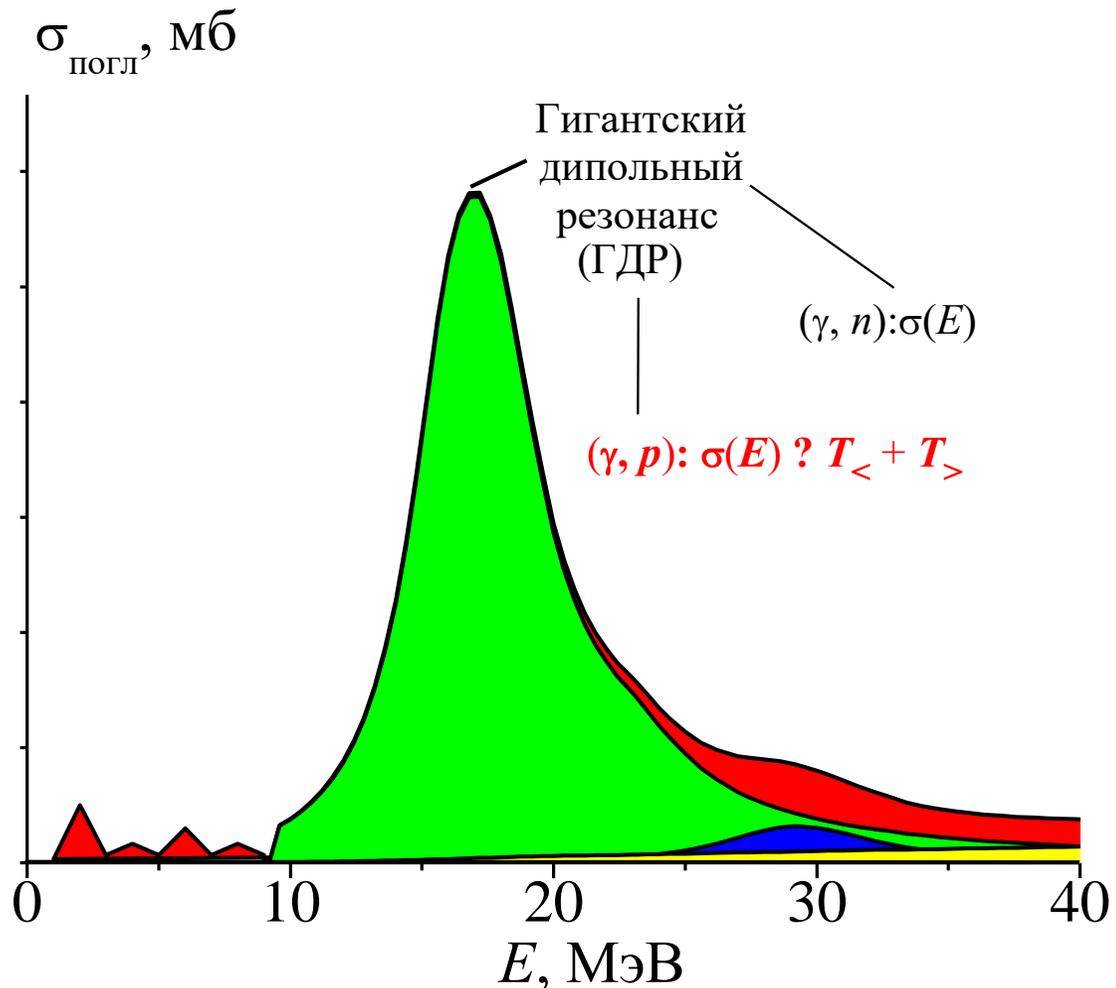


Рис. 1. Схематическое представление сечения фотопоглощения фотонов атомными ядрами

$$\sigma_{GDR}(E_\gamma) = \sigma_{T<}(E_\gamma) + \sigma_{T>}(E_\gamma)$$

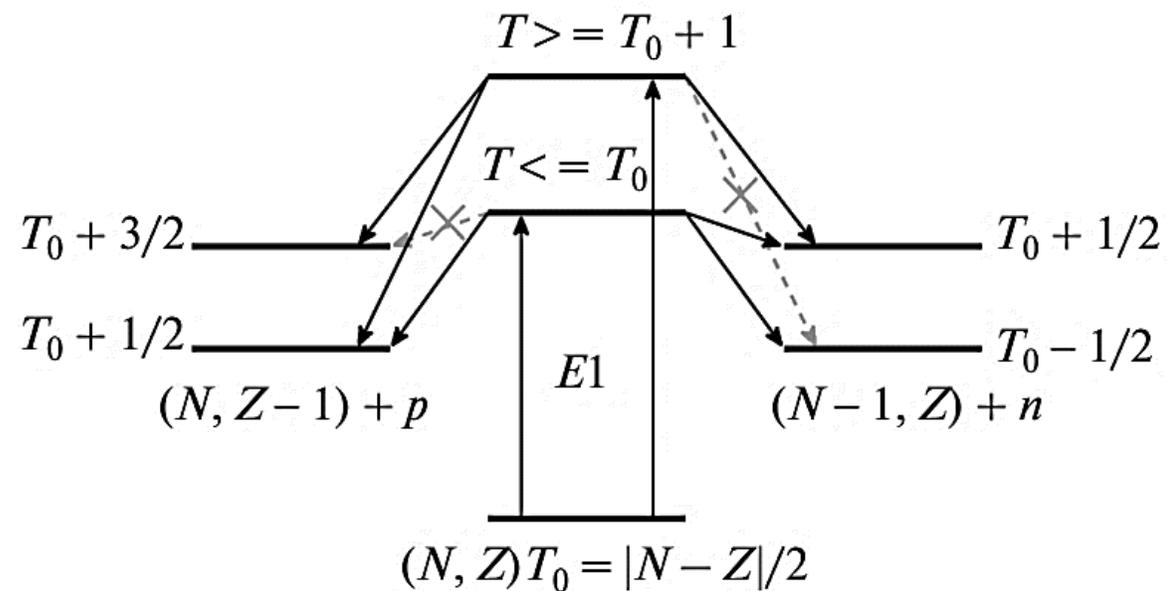


Рис. 2. Схема возбуждения состояний $T <$ и $T >$ в ядре (N, Z) и их распад по нейтронному и протонному каналам

Существующие данные о фотоядерных реакциях на изотопах ^{nat}Se , ^{nat}Mo , ^{nat}Cd и ^{nat}Pt



Предыдущие измерения по ^{nat}Se :

(γ, n) в 9–24 МэВ:

- Goryachev A.M. et. al., VTYF 8 (1982)
Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 47 (2010)
Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 48 (2011)
Kitatani F. et. al., Nucl. Sci. and Tech. 53 (2016)
Yates S. et. al., Physical Review C. 98 (2018)

$(\gamma, 2n)$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ в 18–28 МэВ:

- Carlos P. et. al., Nuclear Physics A. 258 (1976)



Предыдущие измерения по ^{nat}Mo :

(γ, n) в 10–24 МэВ:

- Mutsuro N. et. al. Phys. Soc. Jap. 14 (1959)
Banu A. et. al. Physical Review C. 99 (2019)
Utsunomiya H. et. al. Physical Review C. 88 (2013)

$(\gamma, 2n)$, $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ в 12–29 МэВ:

- Beil H. et. al., Nuclear Physics A. 227 (1974)
Ishkhanov B.S. et. al. Nucl. Phys. 702 (1970)



Предыдущие измерения по ^{nat}Cd :

$^{nat}\text{Cd}(\gamma, n)$ и $^{nat}\text{Cd}(\gamma, p)$ в 23,55,60 МэВ:

- Karamian S.A. et.al., Yad. Fiz., 78 (2015)
Belyshev S.S. et.al., Yad. Fiz., 79 (2016)
Nadeem M. et al., Chinese Physics C, 45 (2021)



Предыдущие измерения по ^{nat}Pt :

$(\gamma, n) + (\gamma, pn) + (\gamma, 2n)$ в 10–24 МэВ:

- Goryachev A.M. et.al., Yad. Fiz., 27 (1978)
Goryachev A.M. et.al., ZEP, 26 (1978)

$^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197m}\text{Pt}$ в 8–17 МэВ:

- Zheltonozhsky V.A. et.al., Yad. Fiz., 67 (2004)

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПУЧКАХ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

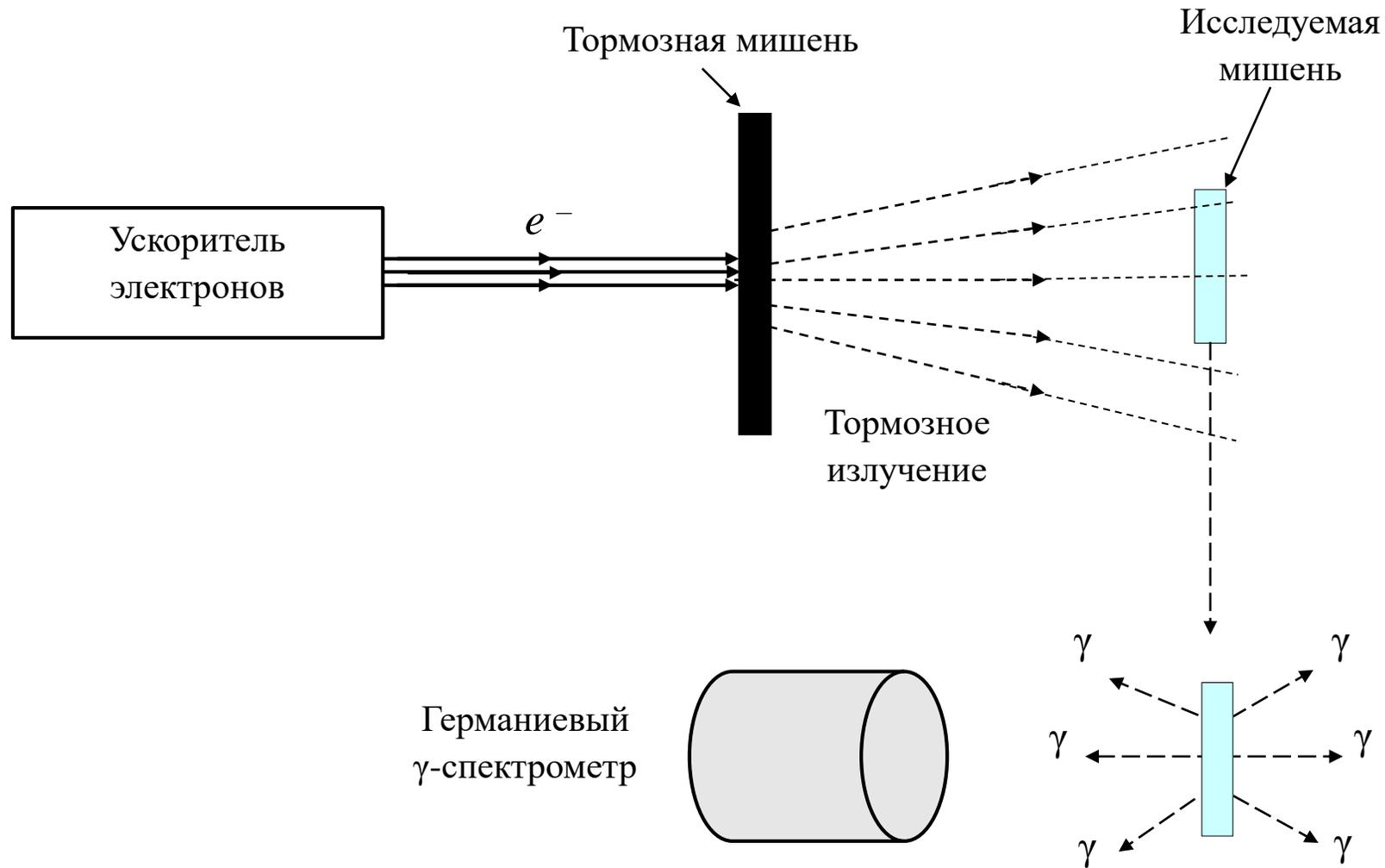


Рис. 3. Геометрия облучения и измерений образцов

Определение выходов фотоядерных реакций

Экспериментальное значение выхода продукта реакции вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{эксн}} = \frac{S \cdot C_{\text{abs}}}{\varepsilon \cdot I_{\gamma}} \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} \frac{1}{N} \frac{1}{N_e} \frac{e^{\lambda \cdot t_{\text{cool}}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}}} \frac{\lambda \cdot t_{\text{irr}}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{irr}}}}, \quad (1)$$

где

S — пик полного поглощения

C_{abs} — коэффициент учитывающий самопоглощение в мишени

ε — эффективность детектора

I_{γ} — квантовый выход

N — число атомов в активационной мишени

N_e — число электронов падающих на тормозную мишень

λ — постоянная распада

t_{irr} и t_{cool} — время облучения и время охлаждения

t_{live} и t_{real} — живое и реальное времени измерения спектров

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_e}{N_e}\right)^2}$$

Расчетные значения выхода

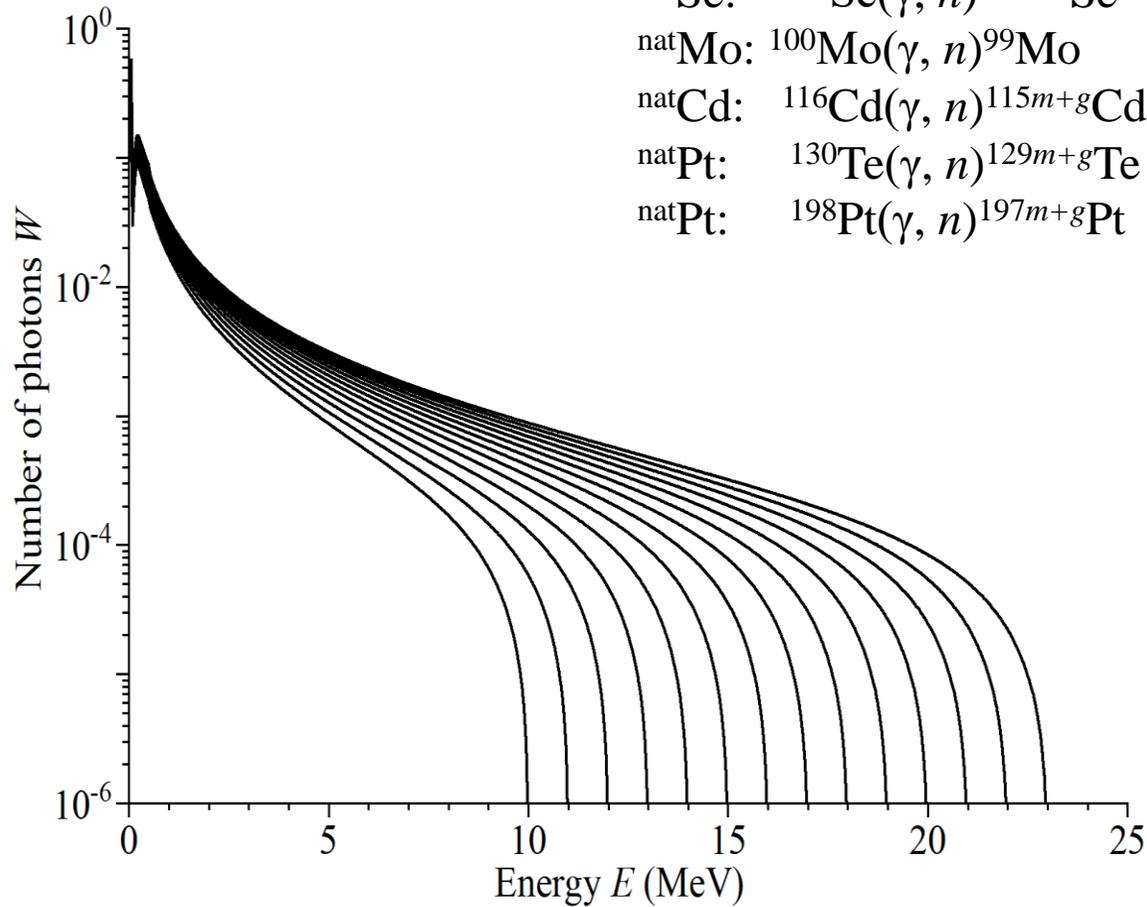
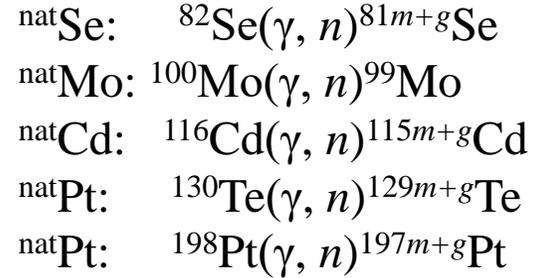


Рис. 4. Плотности распределения числа тормозных фотонов на один электрон ускорителя в тормозной мишени из вольфрама толщиной 3 мм при энергии электронов в интервале 10–23 МэВ

Расчетное значение выхода продукта реакции вычисляется по формуле :

$$Y_{\text{теор}} = \sum_i \eta_i \int_{E_{i,\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_i(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE, \quad (2)$$

где индекс i соответствует номеру реакции, дающей вклад в образование исследуемого изотопа,

η_i — процентное содержание исследуемого изотопа в природной смеси изотопов селена,

$\sigma_i(E)$ — сечение соответствующей фотоядерной реакции, рассчитанное с помощью программного кода TALYS и КМФР,

$W(E, E_{\gamma\text{max}})$ — плотность распределения числа тормозных фотонов по энергии на один электрон пучка ускорителя

$$Y_{\text{отн},i} = \frac{\eta_i \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_i(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE}{\eta \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\gamma\text{max}}} \sigma_{(\gamma,n)}(E) W(E, E_{\gamma\text{max}}) dE} \quad (3)$$

Расчет сечений фотоядерных реакций

$$\sigma_{\text{TALYS}}(E_\gamma) = \sigma_{\text{GDR}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{QD}}(E_\gamma)$$

$$\sigma_{\text{KMФР}}(E_\gamma) = \sigma_{\text{GDR}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{QD}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{IVQR}}(E_\gamma) + \sigma_{\text{GDR2}}(E_\gamma)$$

$$\rightarrow \text{KMФР: } \sigma_{\text{GDR}}(E_\gamma) = \sigma_{T<}(E_\gamma) + \sigma_{T>}(E_\gamma)$$

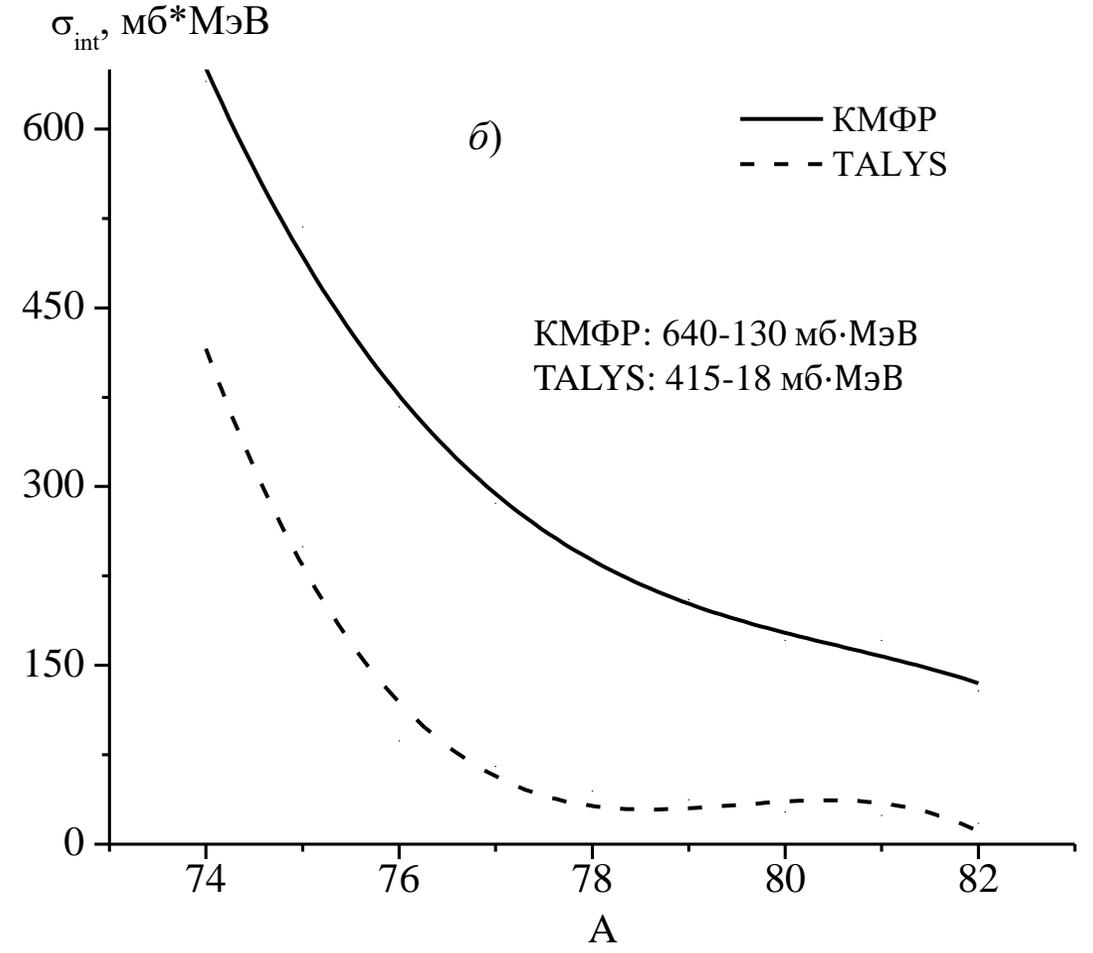
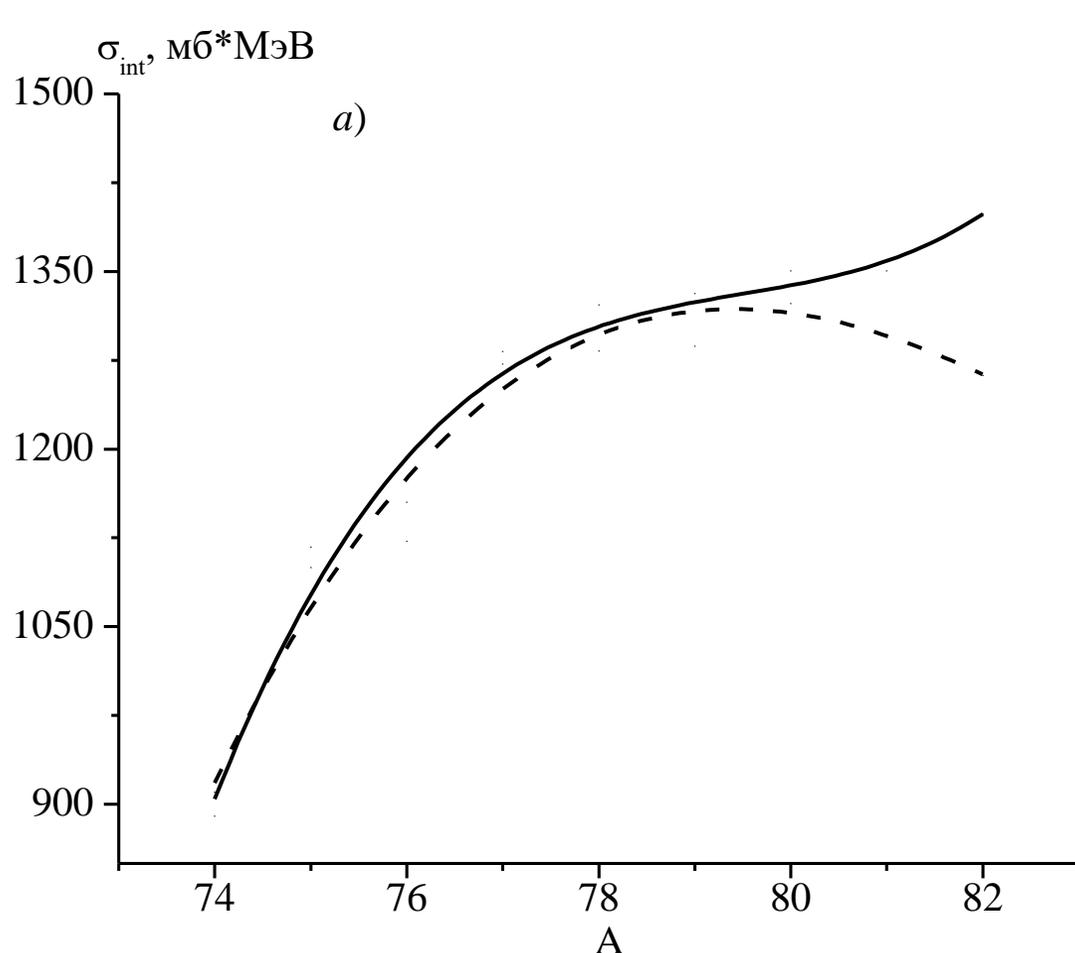


Рис. 5. Расчет сечений фотонейтронных (a) и фотопротонных (б) реакций на основе программного кода TALYS и KMФР

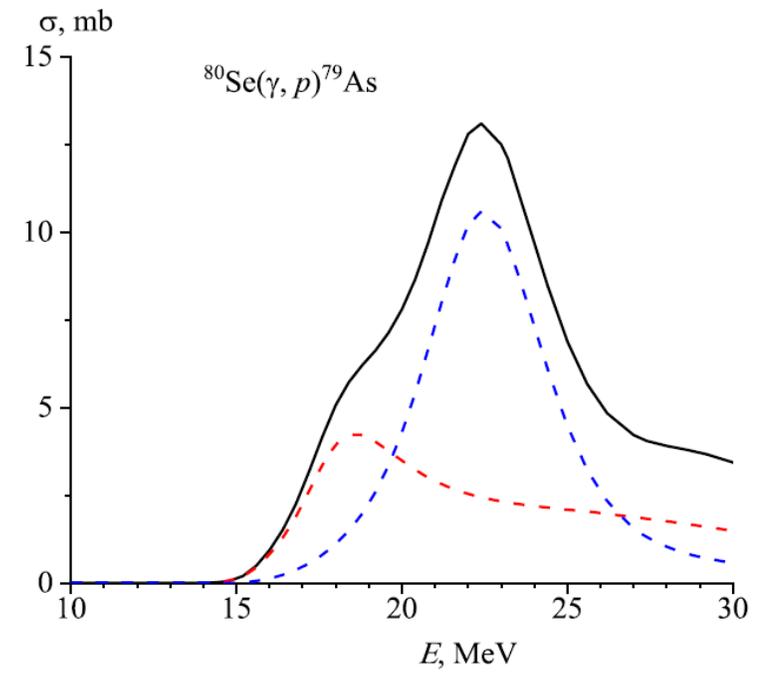
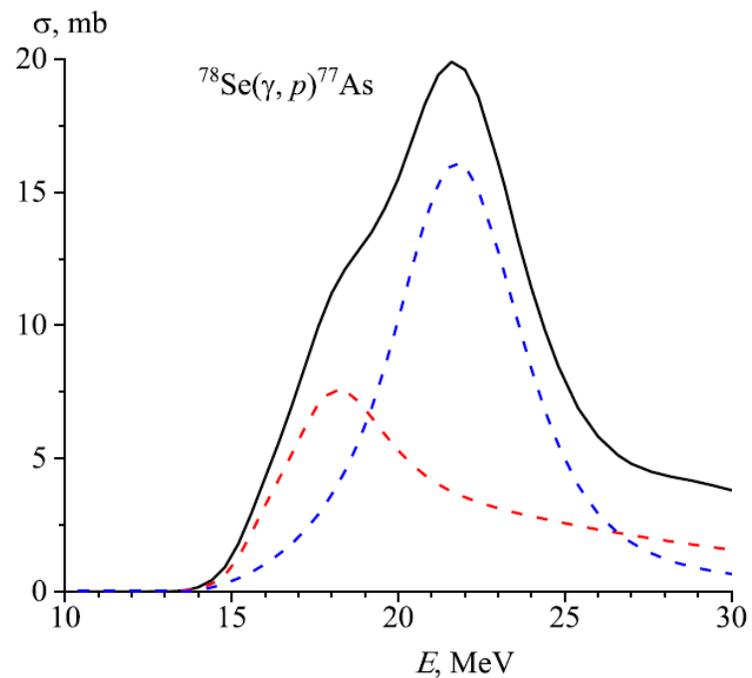
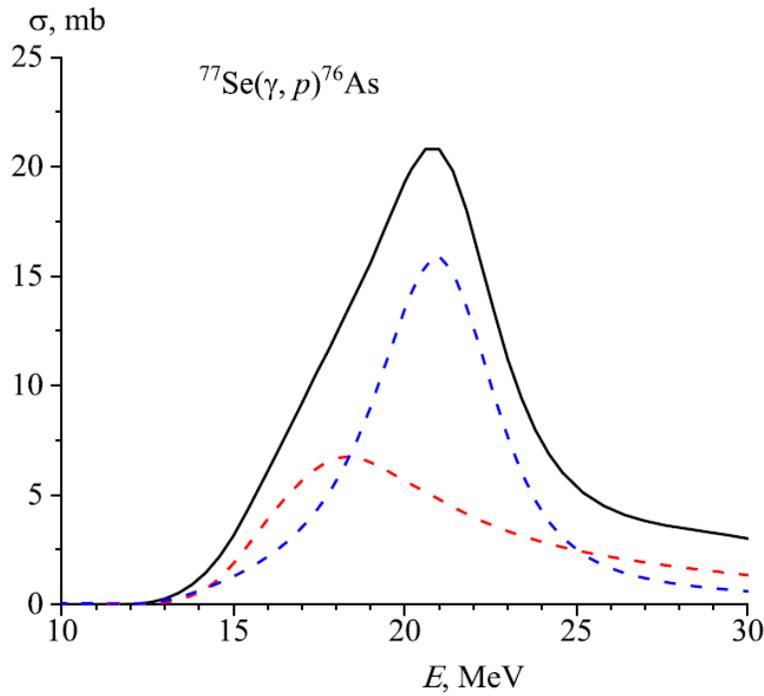
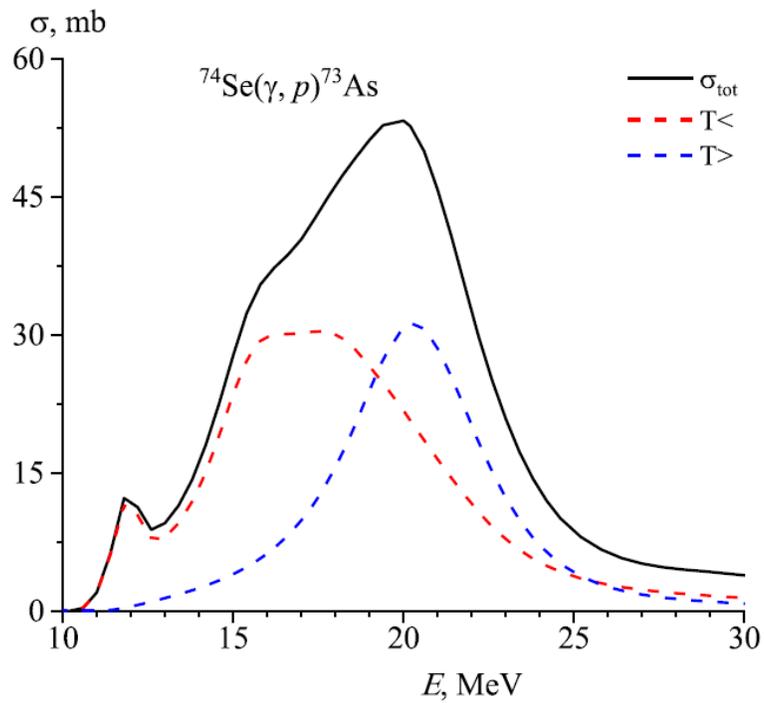


Рис. 6. Сечения реакций и сечения компонент ГДР $T_{<} = T_0$ и $T_{>} = T_0 + 1$ реакций (γ, p) на изотопах $^{74,76,77,80}\text{Se}$

Облучения на МТ-25 ЛЯР ОИЯИ

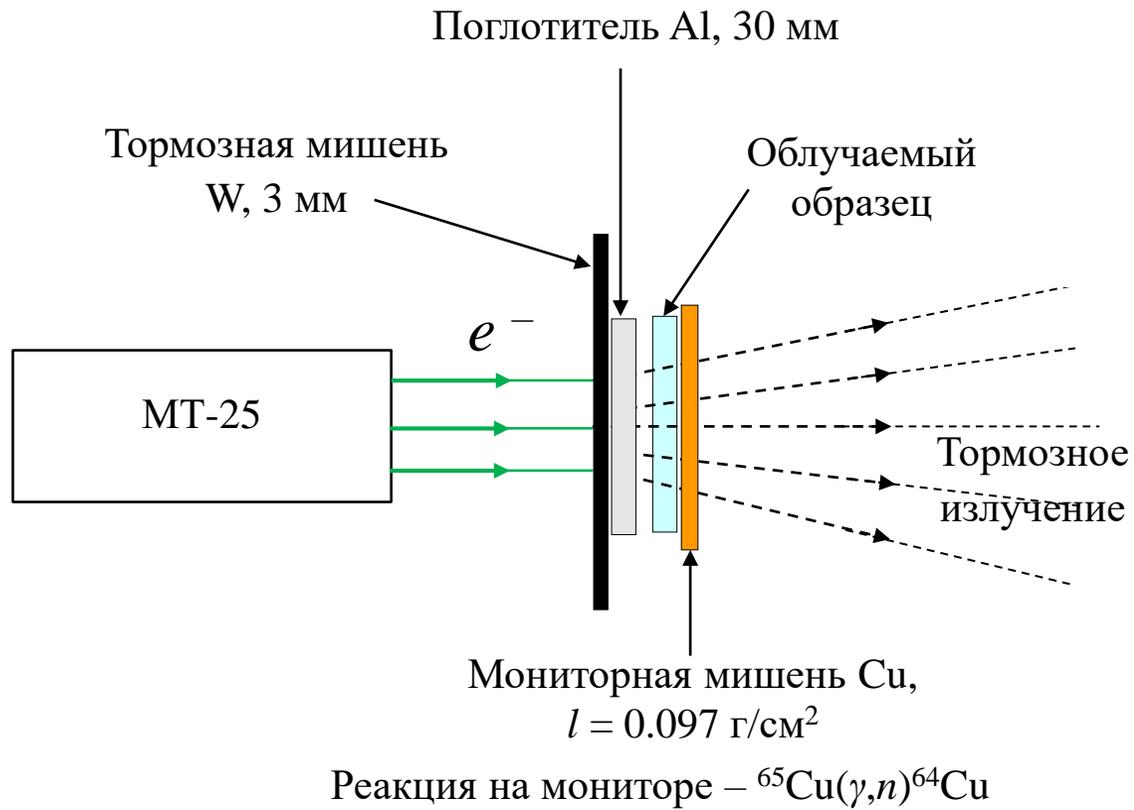


Рис. 7. Схема проведения облучения

Таблица 1. Основные параметры экспериментов

Энергия электронов, МэВ	Интегральный заряд, мКл	Время облучения, мин
10–13	10	50
14–23	5	25



Эффективность детектора

Для каждого облучения были измерены спектры с длительностью измерения 10 мин, 30 мин, 1 час, 12 часов и 1 сут.

ОСГИ: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am

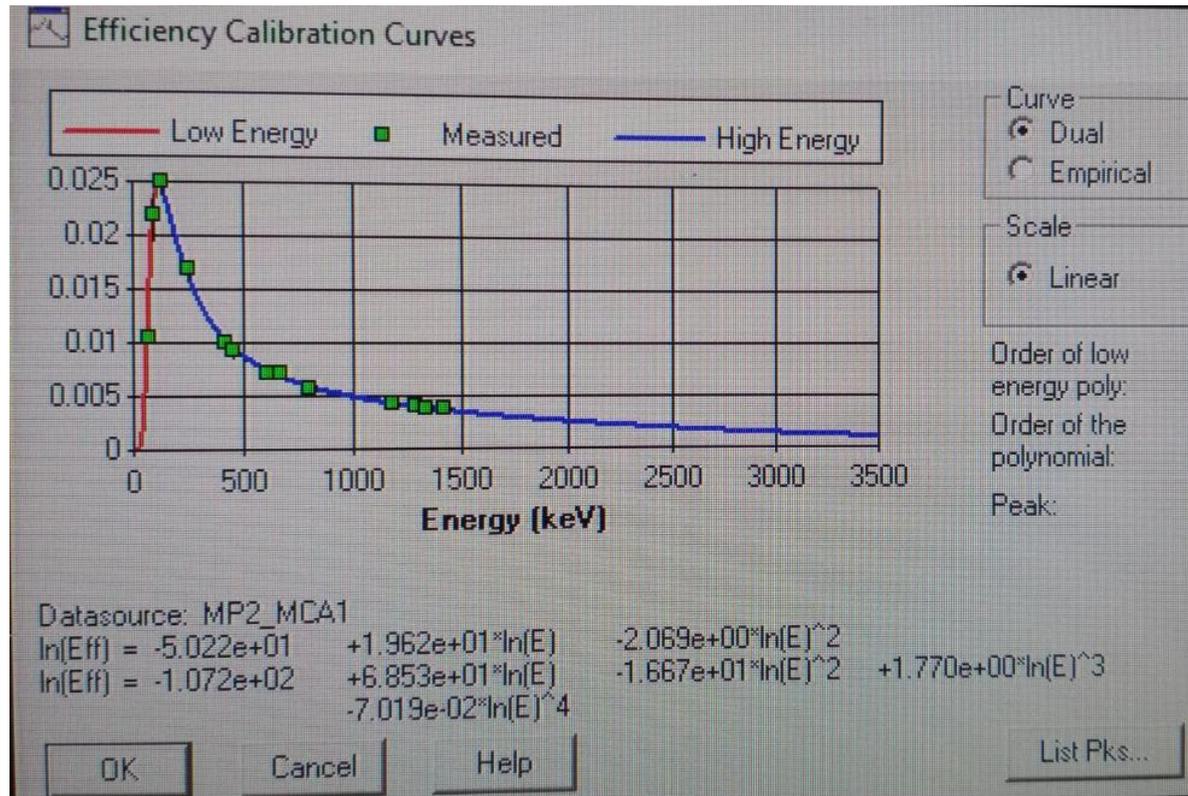


Рис. 8. Кривые абсолютной эффективности для позиции на расстоянии от мишени до детектора 5 см



Рис. 9. Внешний вид спектрометра CANBERRA GC3018

Примеры гамма-спектров облученной мишени

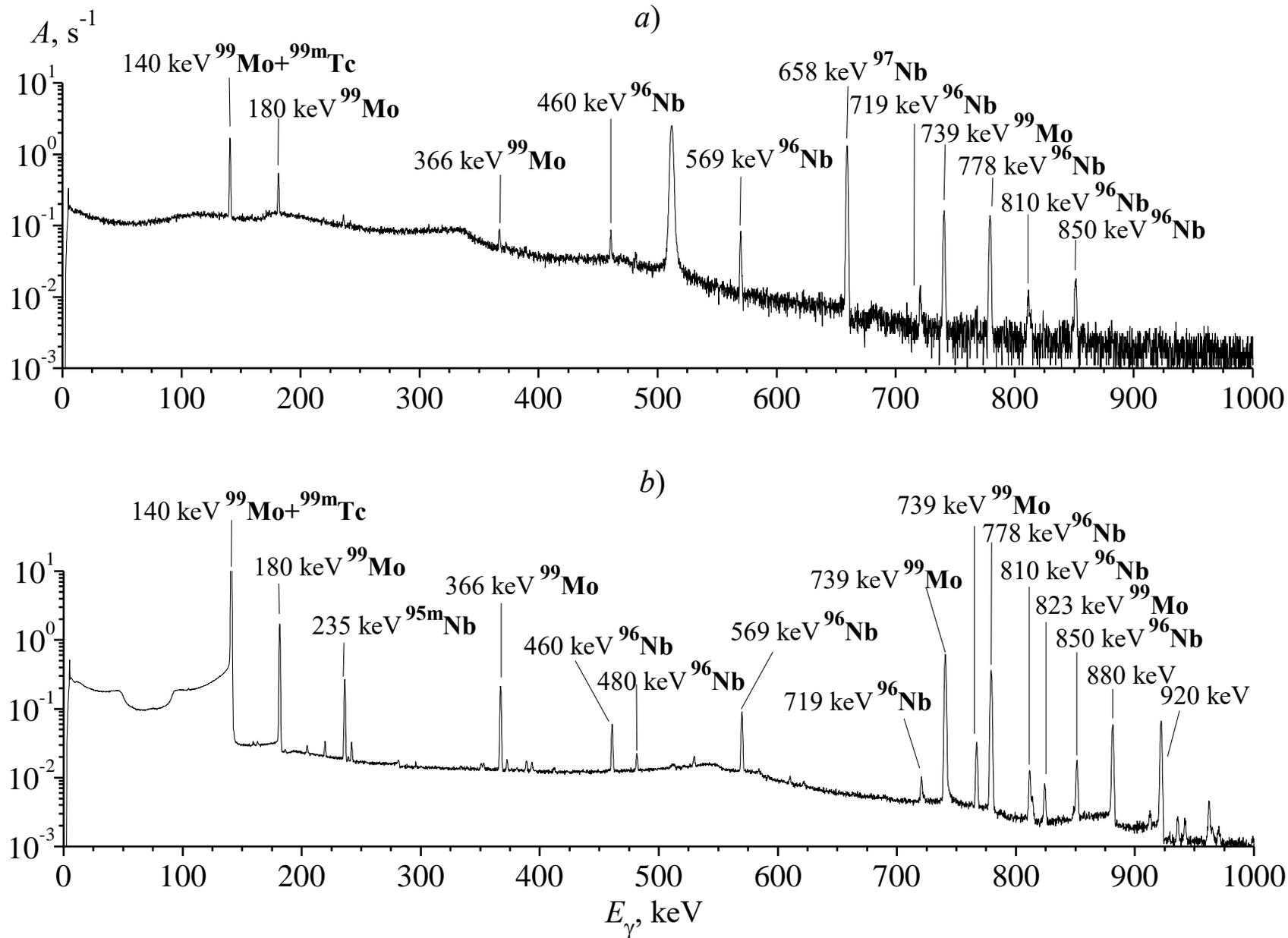


Рис. 10. Спектры остаточной активности облученного образца ^{nat}Mo (сверху вниз) через 1,5 ч (a) и через 2 суток (b) после облучения. Продолжительность измерения спектров составила 1 час (a) и 1 день (b) соответственно. Конечная энергия тормозного излучения, использованная для облучения, составляла 23 МэВ

Результаты экспериментов

Результаты по реакциям $^{nat}\text{Se}(\gamma, p)^{76,77,79}\text{As}$

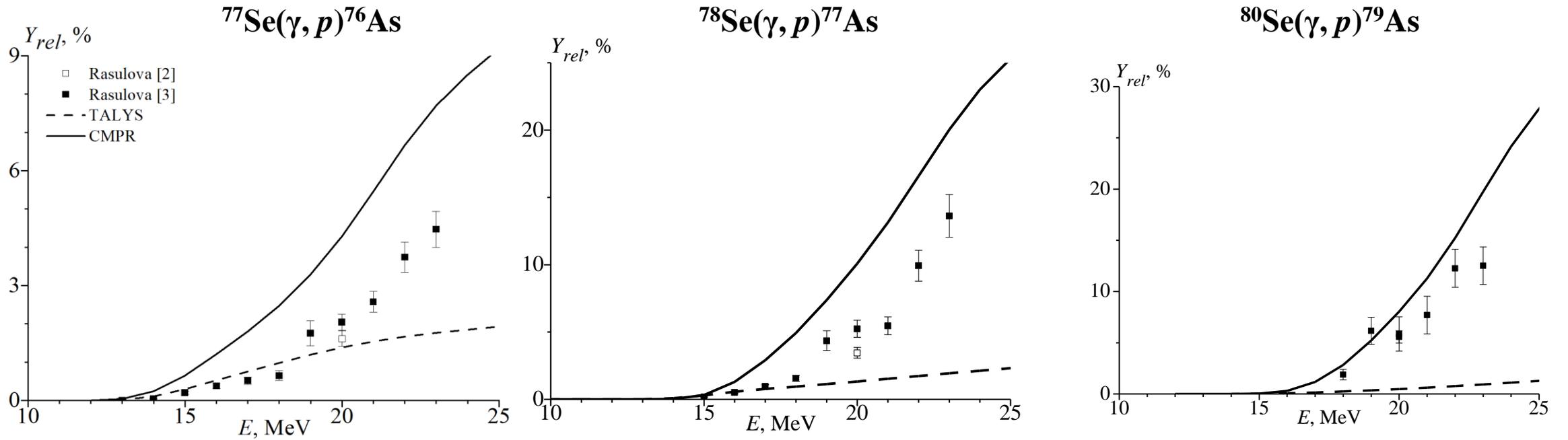


Рис. 11. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

[2] Rasulova F.A. et. al. NIM A, 1045: 168428 (2023).

[3] Rasulova F.A., et. al. Chinese Physics C, 48: 024002 (2024).

Результаты по реакциям ${}^{\text{nat}}\text{Mo}(\gamma, p){}^{95m+g,96,97}\text{Nb}$

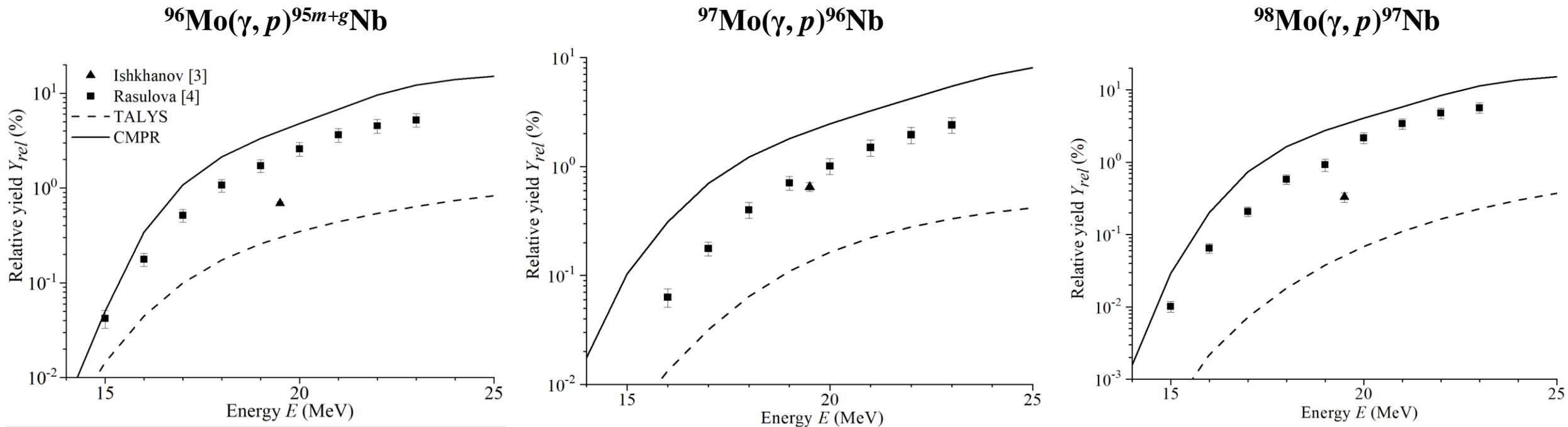


Рис. 12. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

[3] Ishkhanov B.S. et.al. Physics of Atomic Nuclei, 77, 1362 (2014).

[4] Rasulova F.A., et. al. Physical Review C, 111, 024604 (2025).

Результаты по реакциям ${}^{\text{nat}}\text{Cd}(\gamma, p){}^{105,111,112}\text{Ag}$

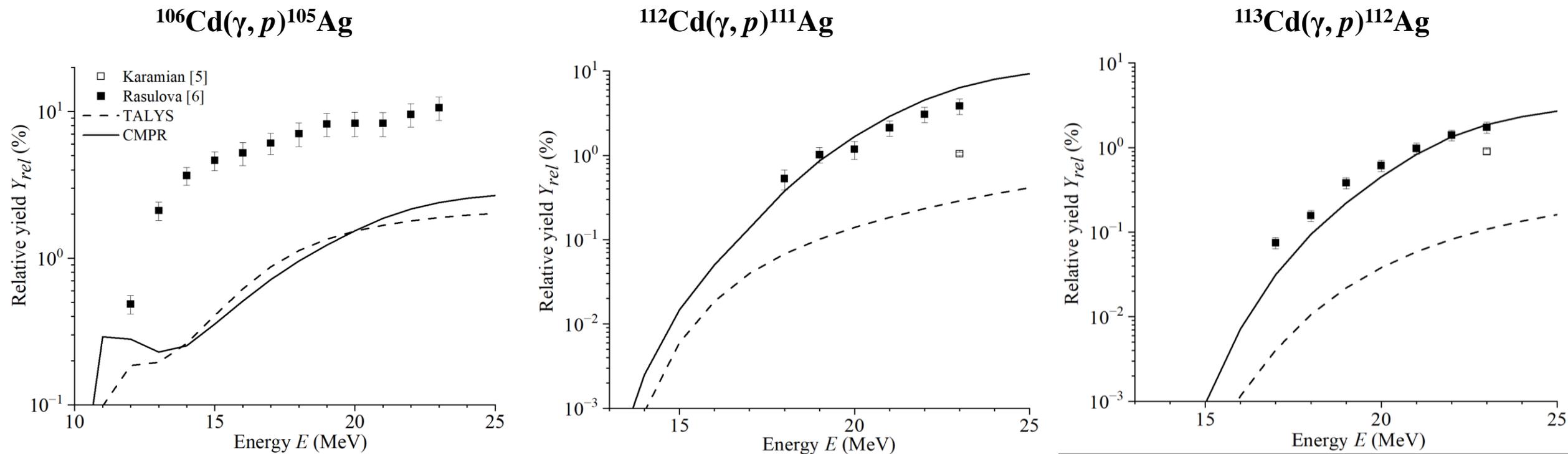


Рис. 13. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

[5] Karamian S.A. et.al. Physics of Atomic Nuclei, 78, 757 (2015).

[6] Rasulova F.A., et. al. in the process of submitting.

Результаты по реакциям $^{nat}\text{Cd}(\gamma, p)^{113,115}\text{Ag}$

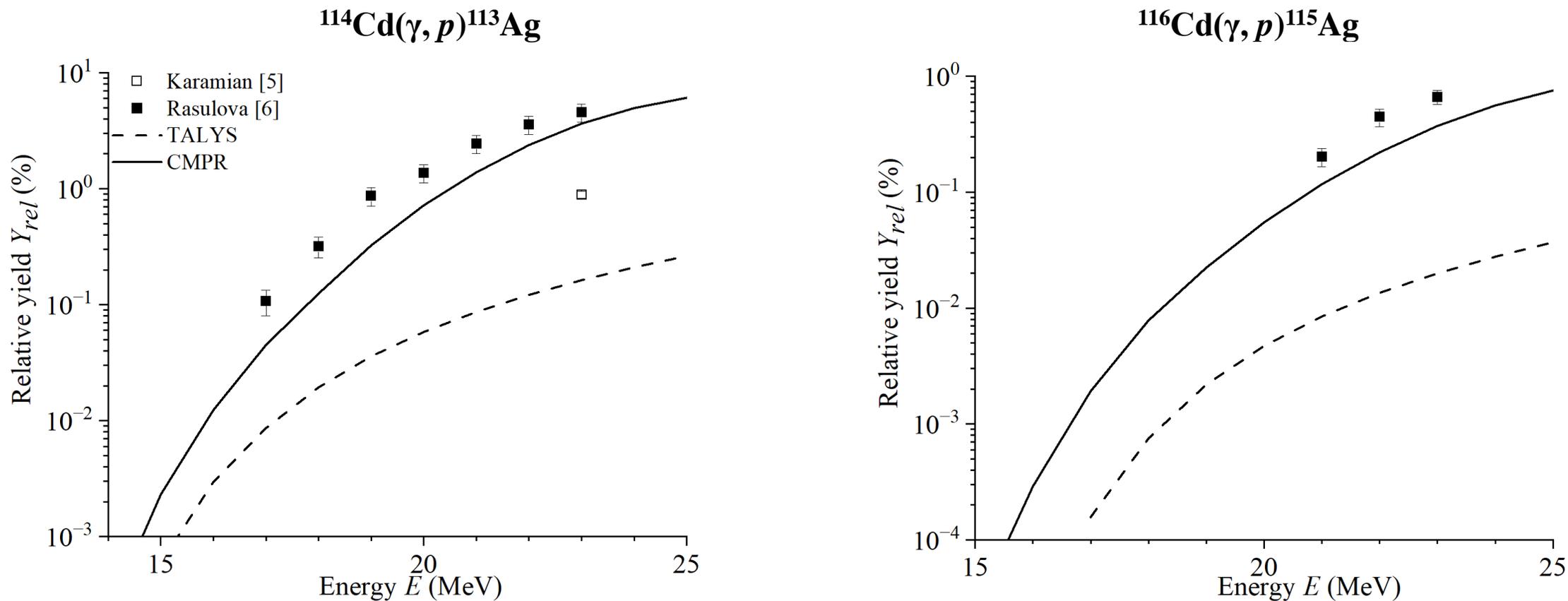


Рис. 14. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

[5] Karamian S.A. et.al. Physics of Atomic Nuclei, 78, 757 (2015).

[6] Rasulova F.A., et. al. in the process of submitting.

Результаты по реакциям $^{nat}\text{Te}(\gamma, p)^{127,129}\text{Sb}$

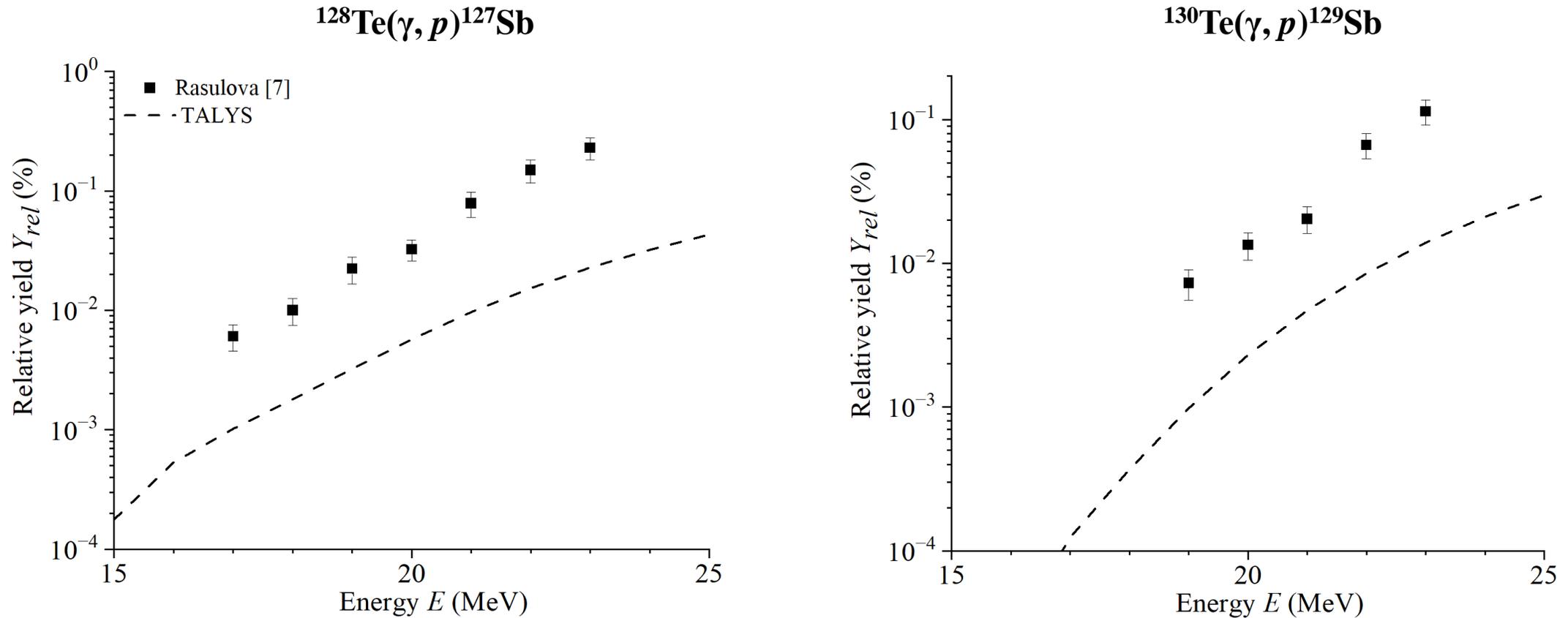


Рис. 15. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

[7] Rasulova F.A., et. al. in the process of submitting.

Результаты по реакциям $^{nat}\text{Pt}(\gamma, p)^{194m+g}, ^{195m+g}\text{Ir}$

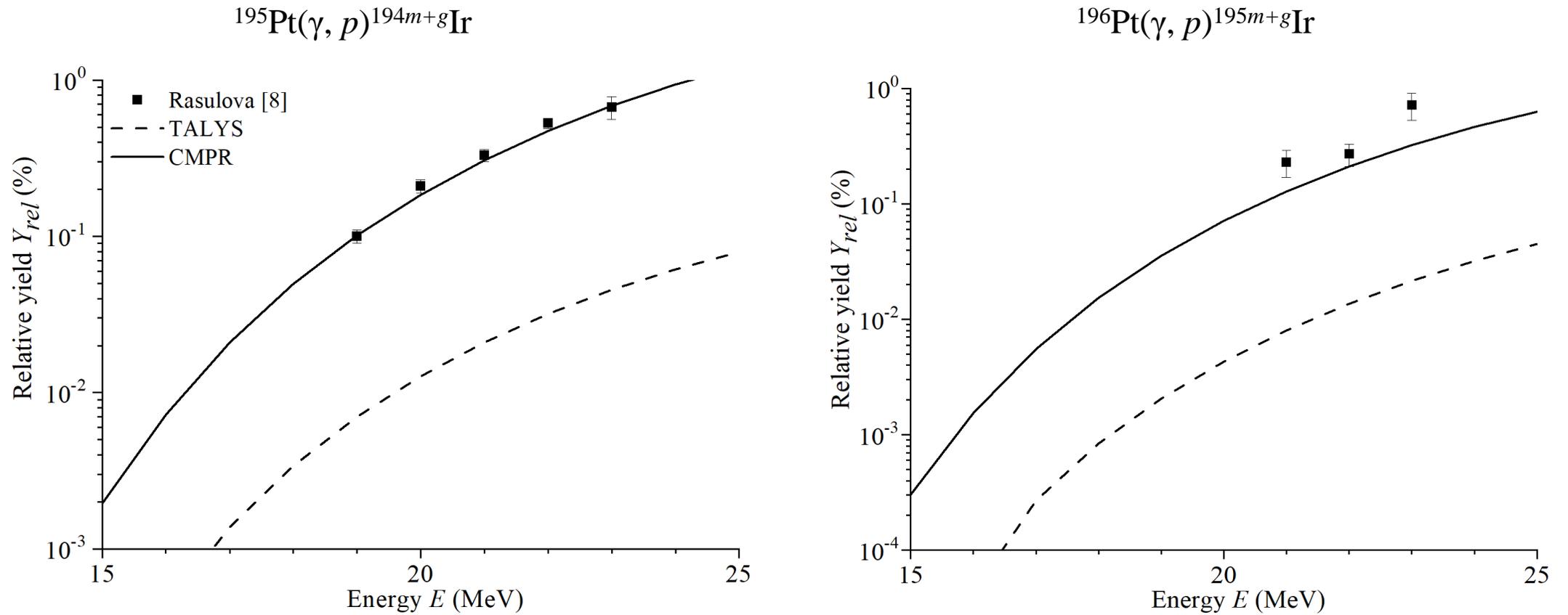


Рис. 16. Относительные выходы фотопротонных реакций в области ГДР

Заключение

- Впервые определены относительные выходы для фотопротонных реакций при облучении мишени ^{nat}Se , ^{nat}Mo , ^{nat}Cd , ^{nat}Te и ^{nat}Pt в поле тормозного излучения в области энергий фотонов 10–23 МэВ.
- Учет изоспинового расщепления в КМФР позволяет описать экспериментальные данные о реакциях с вылетом протонов.
- Активационным методом на пучке тормозных гамма-квантов можно успешно проводить исследования фотоядерных реакций на мишенях сложного изотопного состава.

Список опубликованных работ

1. Rasulova F.A., Aksenov N.V., Alekseev S.I., Aliev R.A., Belyshev S.S., Chuprakov I., Fursova N.Yu., Madumarov A.S., Khushvaktov J.H., Kuznetsov A.A., Yuldashev B.S. *Photonuclear reactions on the stable isotopes of selenium at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV* // **Chinese Physics C**. – 2024. – Vol. 48. – № 2 – p. 024002. (IF=3.6)
2. Rasulova F.A., Belyshev S.S., Demichev M.A., Demin D.L., Evseev S.A., Fursova N.Yu., Gostkin M.I., Khushvaktov J.H., Kobets V.V., Kuznetsov A.A., Rozov S.V., Ruziev E.T., Solnyshkin A.A., Tran T.N., Yakushev E.A., Yuldashev B.S. *Photonuclear reactions on ^{59}Co at bremsstrahlung end-point energies of 40–130 MeV* // **Chinese Physics C**. – 2024. – Vol. 48. – № 11 – p. 114002. (IF=3.6)
3. Rasulova F.A., Aksenov N.V., Alekseev S.I., Belyshev S.S., Chuprakov I., Fursova N.Yu., Madumarov A.S., Khushvaktov J.H., Kuznetsov A.A. *Photonuclear reactions on stable isotopes of molybdenum at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV* // **Phy. Rev. C** – 2025. – Vol. 111. – p. 024604.
4. Rasulova F.A., Aksenov N.V., Alekseev S.I., Belyshev S.S., Bozhikov G. A., Chuprakov I., Fursova N.Yu., Madumarov A.S., Khushvaktov J.H., Kuznetsov A.A. *Photonuclear reactions on stable isotopes of platinum at bremsstrahlung end-point energies of 10-23 MeV* // **Phy. Rev. C** – [Submitted](#).
5. Tran T.N., Rasulova F.A., Belyshev S.S., Demichev M.A., Demin D.L., Evseev S.A., Fursova N.Yu., Gostkin M.I., Hue B.M., Le Hong Khiem, Khushvaktov J.H., Kobets V.V., Kuznetsov A.A., Rozov S.V., Ruziev E.T., Solnyshkin A.A., Teterev Y.G., Yakushev E.A. *Photonuclear reactions on ^{89}Y at bremsstrahlung end-point energies of 40–130 MeV* // **Phy. Rev. C** – [Submitted](#).



**Спасибо за
внимание!**

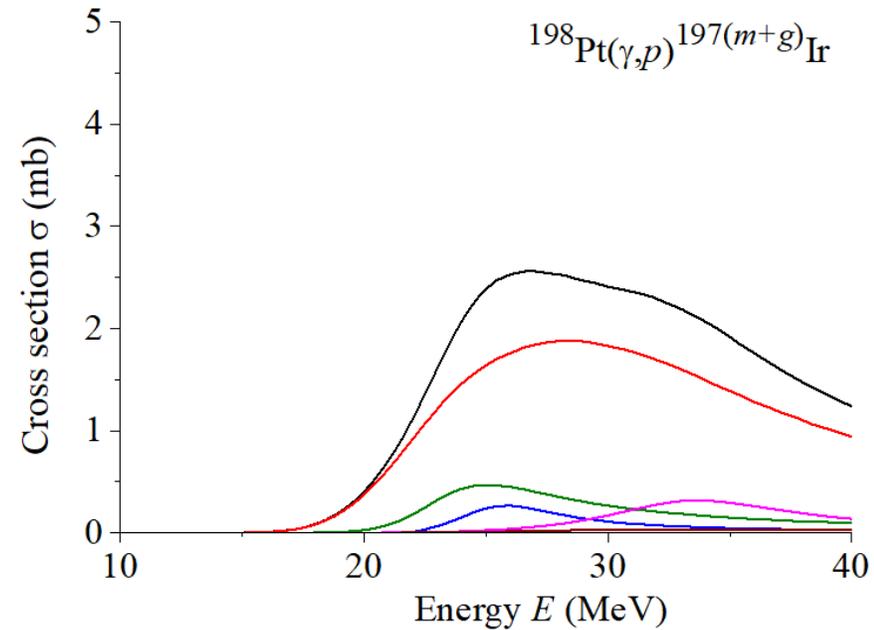
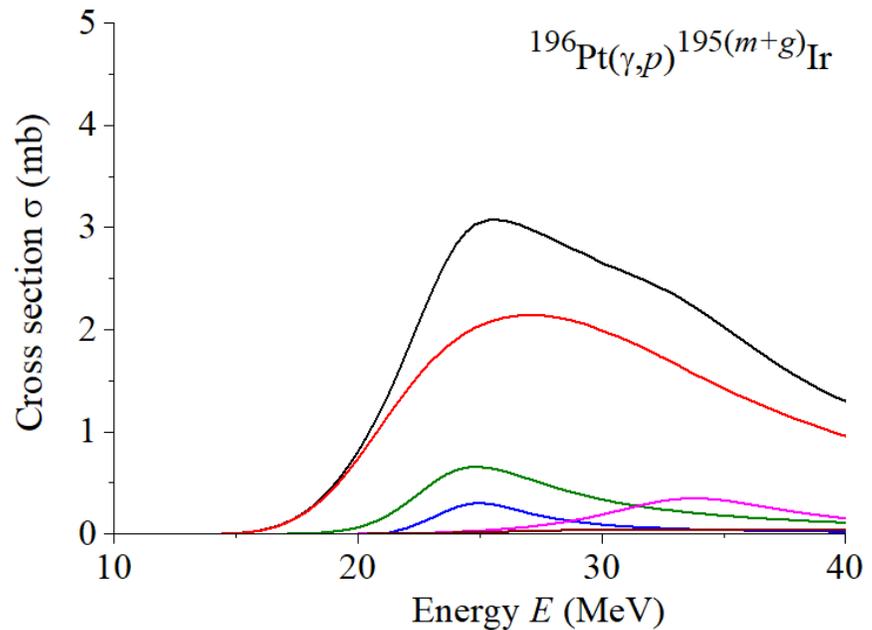
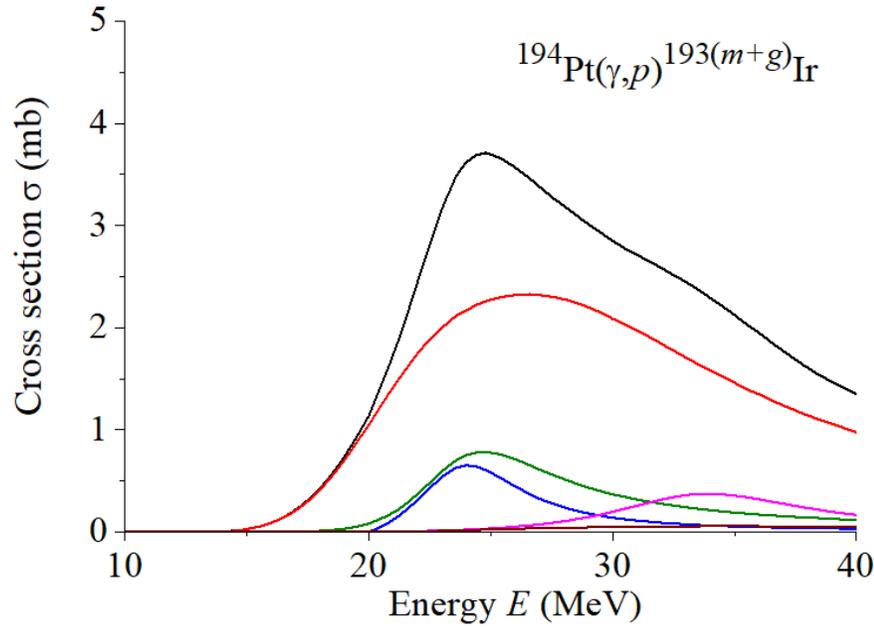
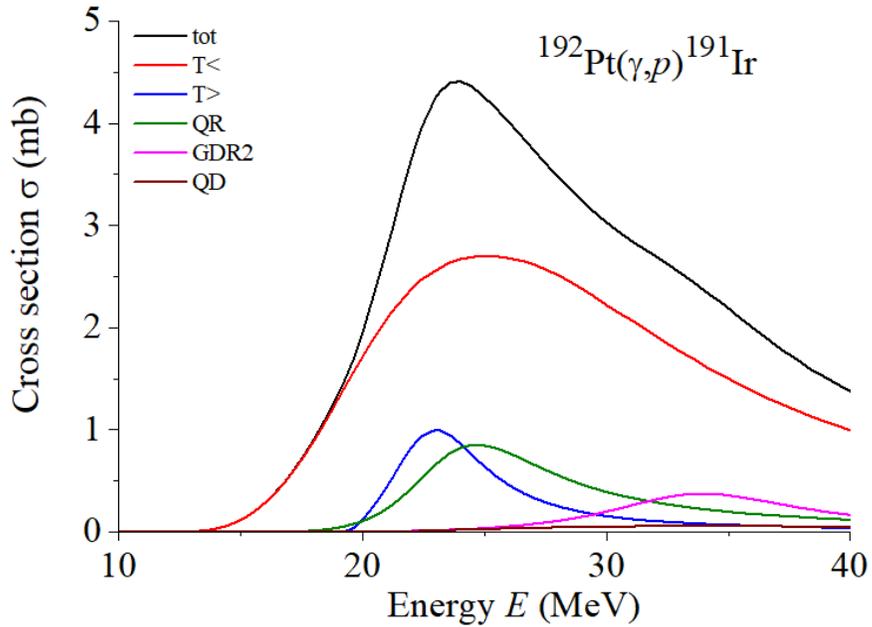


Figure. Cross section reactions (black line) and cross sections of the GDR components $T_{<} = T_0$ (red line) and $T_{>} = T_0 + 1$ (blue line), QR (olive line), GDR2 (magenta line) and QD (wine line) for the reaction (γ, p) on $^{192,194,196,198}\text{Pt}$ isotopes

Высвобождение протона с большей вероятностью наблюдается у более лёгких изотопов:

- 1) часть энергии γ -кванта, переведённая во внутреннюю энергию ядра уменьшается с увеличением массы ядра;
- 2) с увеличением числа нейтронов в изотопах увеличивается энергия отделения [8] из них протона.

Изотопы	^{74}Se	^{77}Se	^{78}Se	^{80}Se
$S(p)$, МэВ	8.545	9.599	10.398	11.412

Изотопы	^{92}Mo	^{96}Mo	^{97}Mo	^{98}Mo
$S(p)$, МэВ	7.462	9.297	9.226	9.795

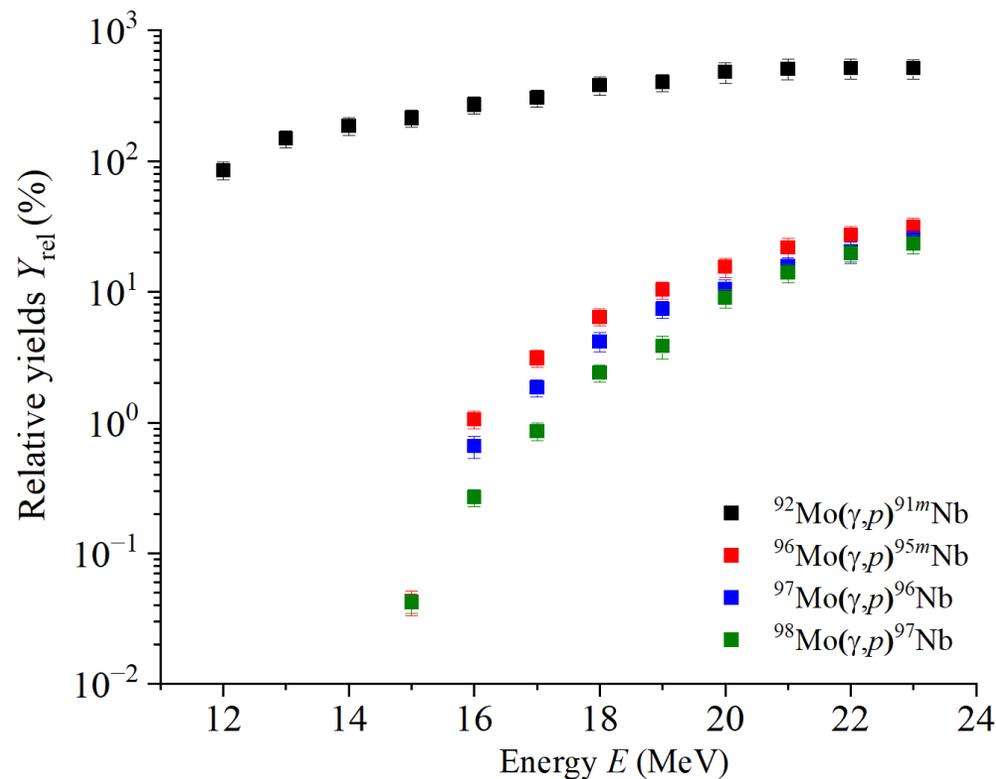
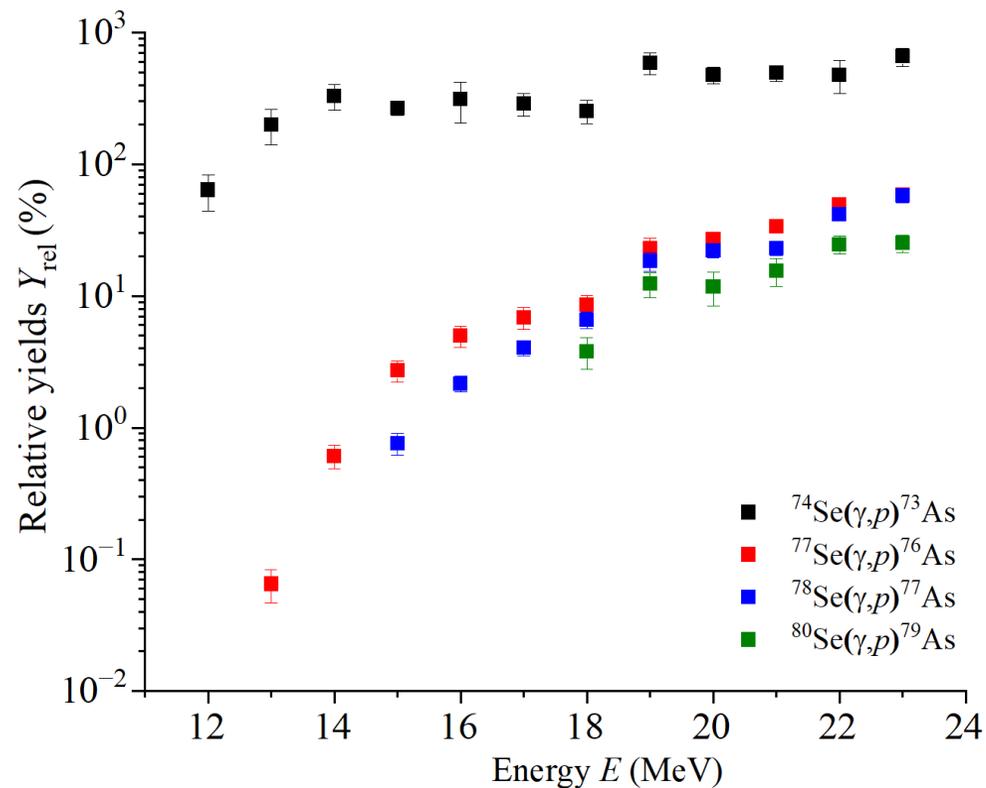


Рис. 16. Сравнение относительных выходов фотопротонных реакций в случае моноизотопа

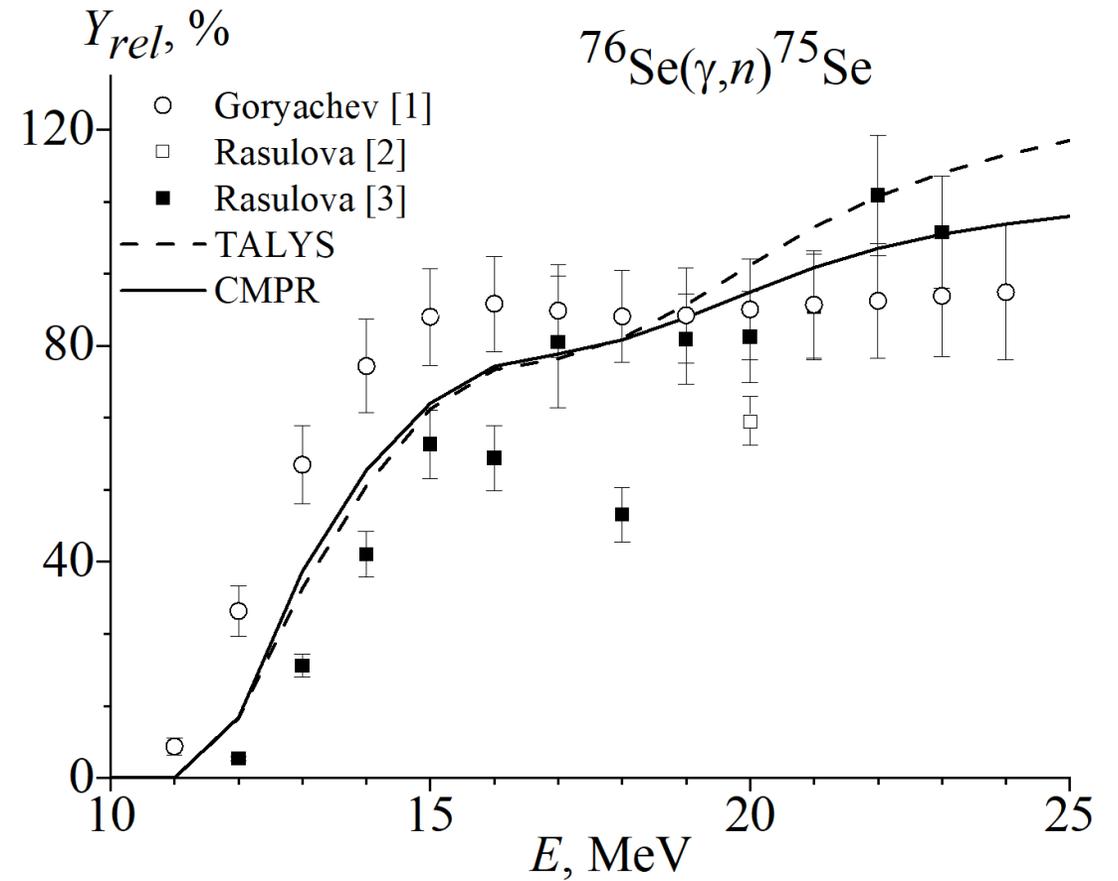
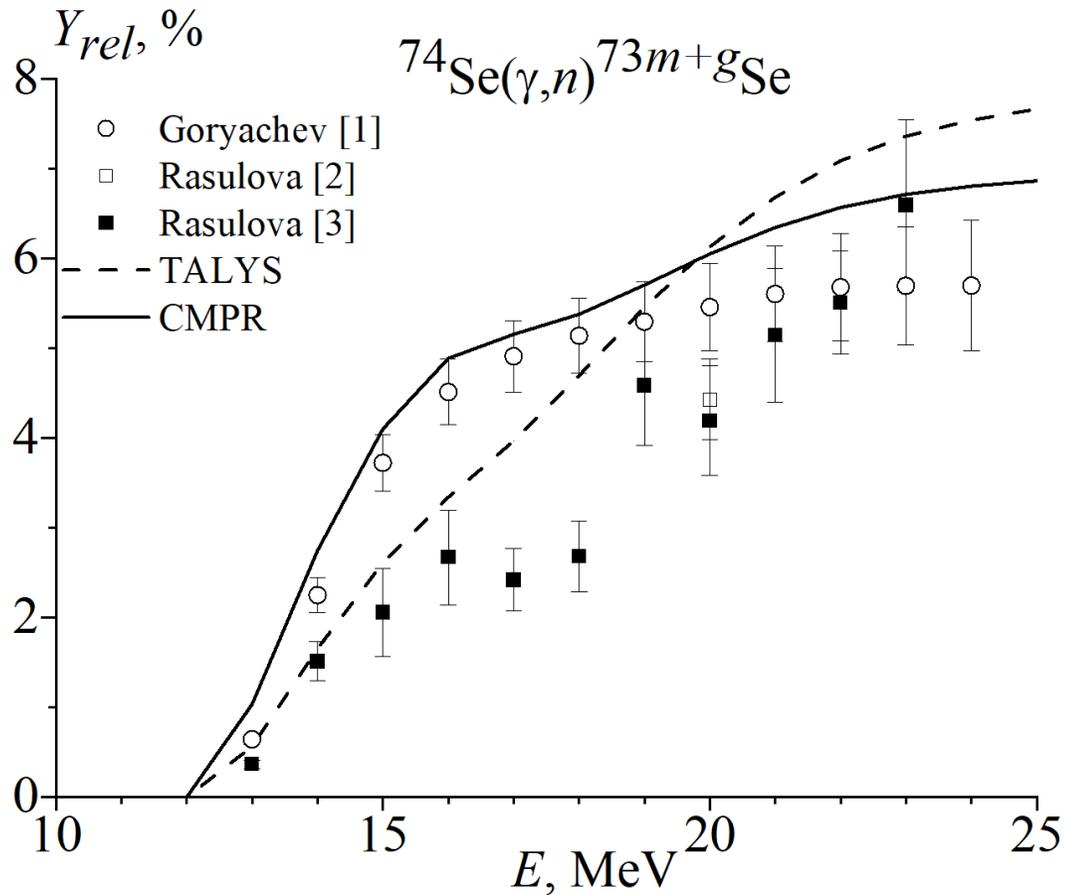


Рис. 10. Относительные выходы фотонейтронных реакций в области ГДР

[1] Goryachev A.M. et. al. VTYF. – 1982. – Vol. 8. – pp. 121-139.

[2] Rasulova F.A. et. al.. NIM A, 1045: 168428 (2023).

[3] Rasulova F.A., et. al. Chinese Physics C, 48: 024002 (2024).

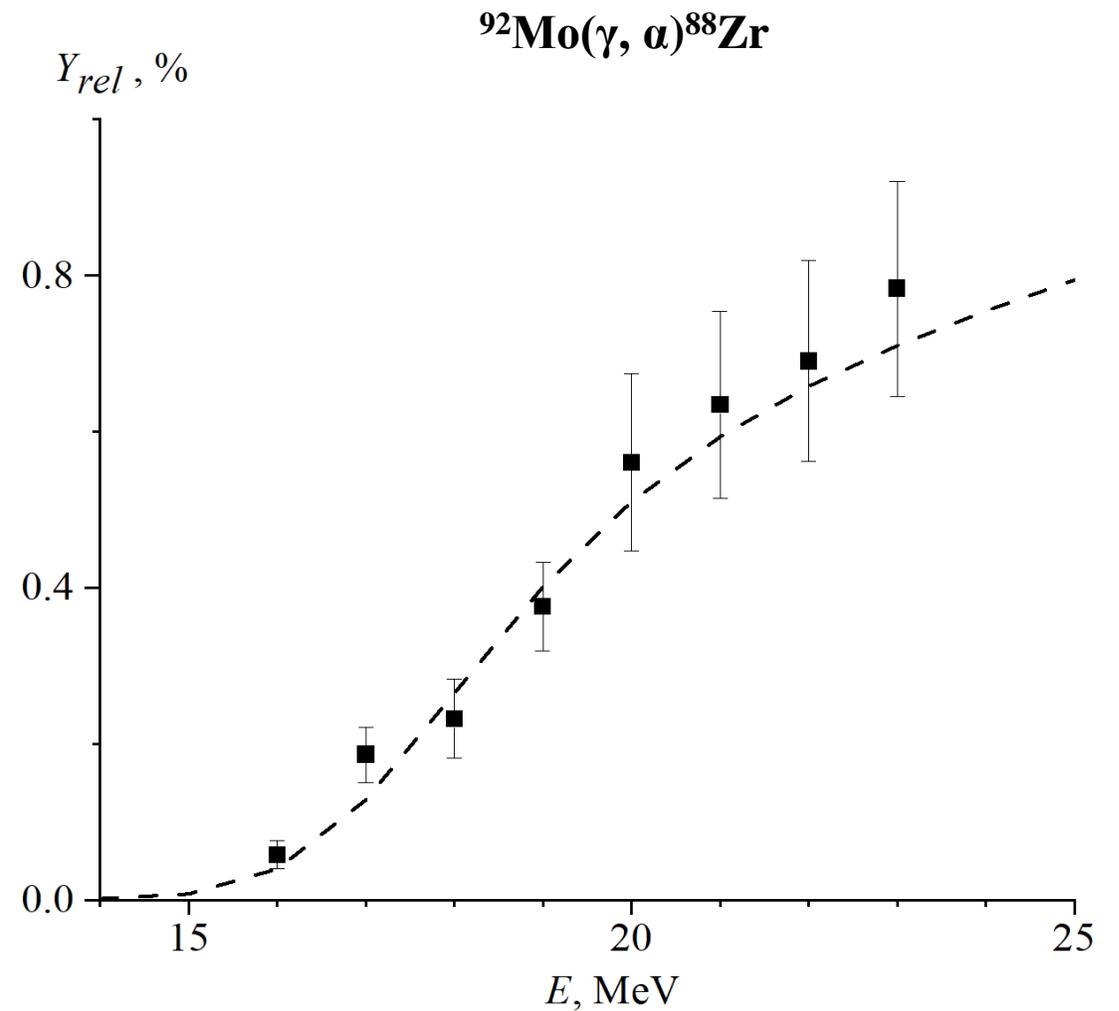
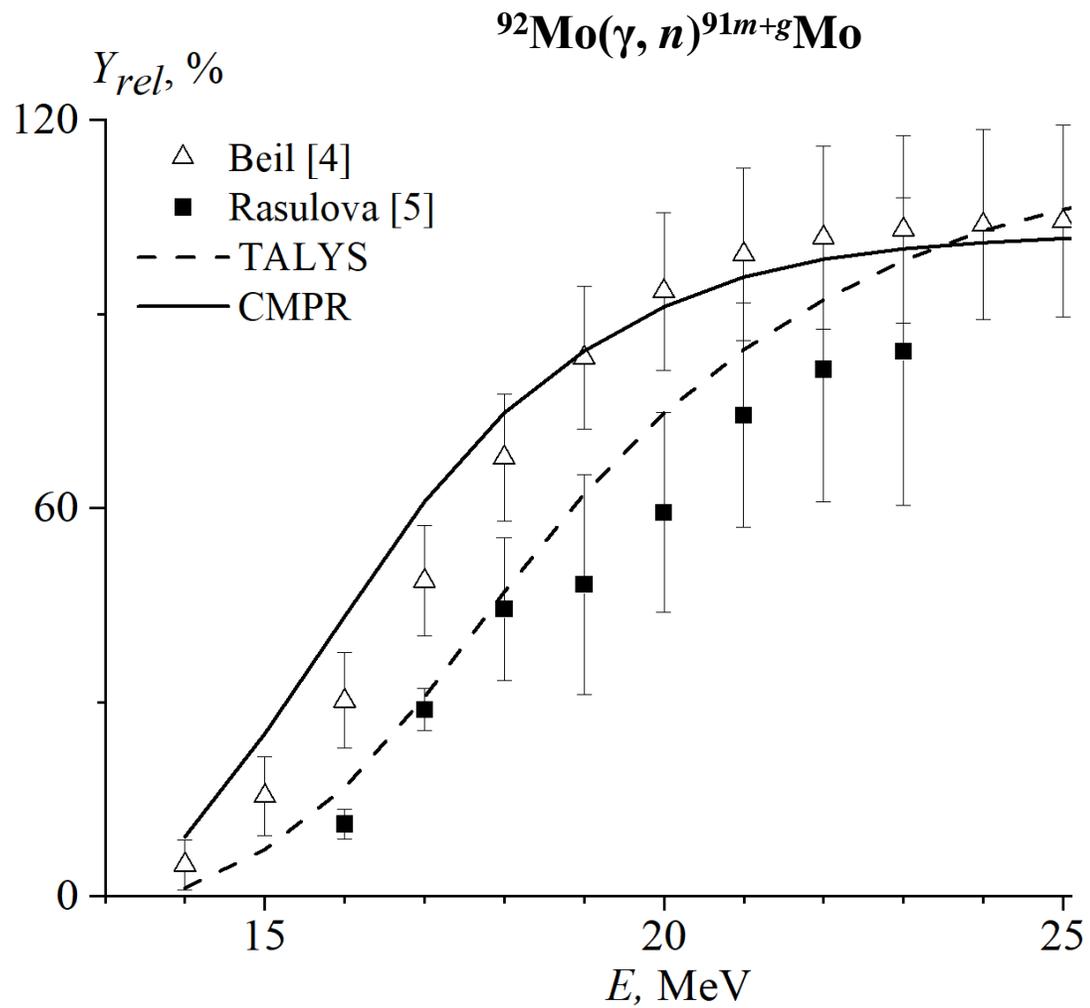


Рис. 12. Относительные выходы реакций $^{92}\text{Mo}(\gamma, n)^{91m+g}\text{Mo}$ и $^{92}\text{Mo}(\gamma, \alpha)^{88}\text{Zr}$ в области ГДР

[4] H. Beil et al. Nucl. Phys. A, 227, 427 (1974).

[5] Rasulova F.A., et. al. Physical Review C, 111, 024604 (2025).

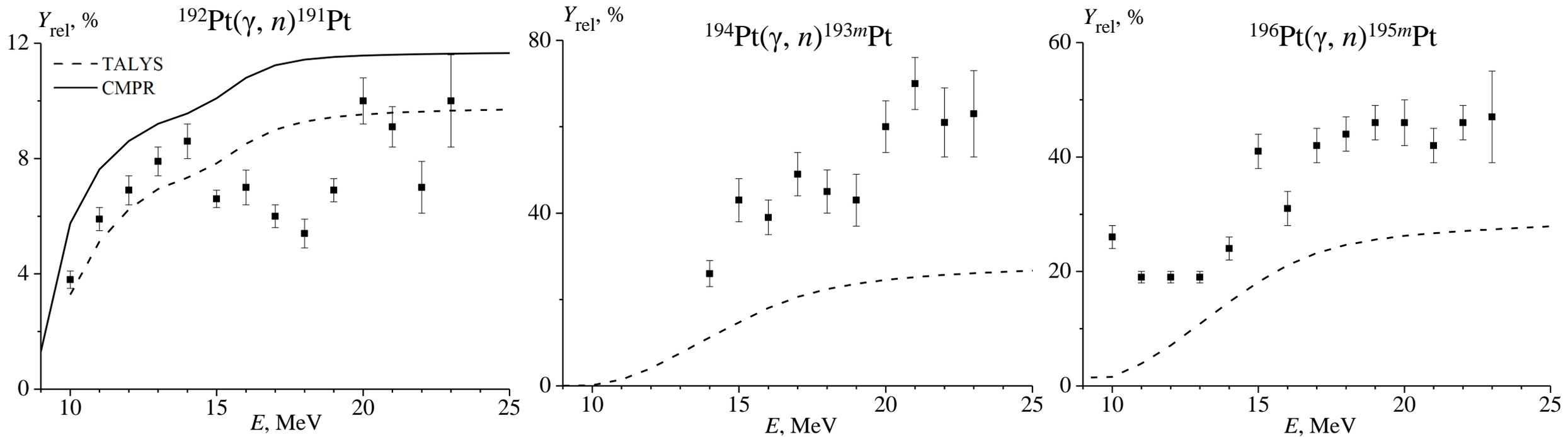
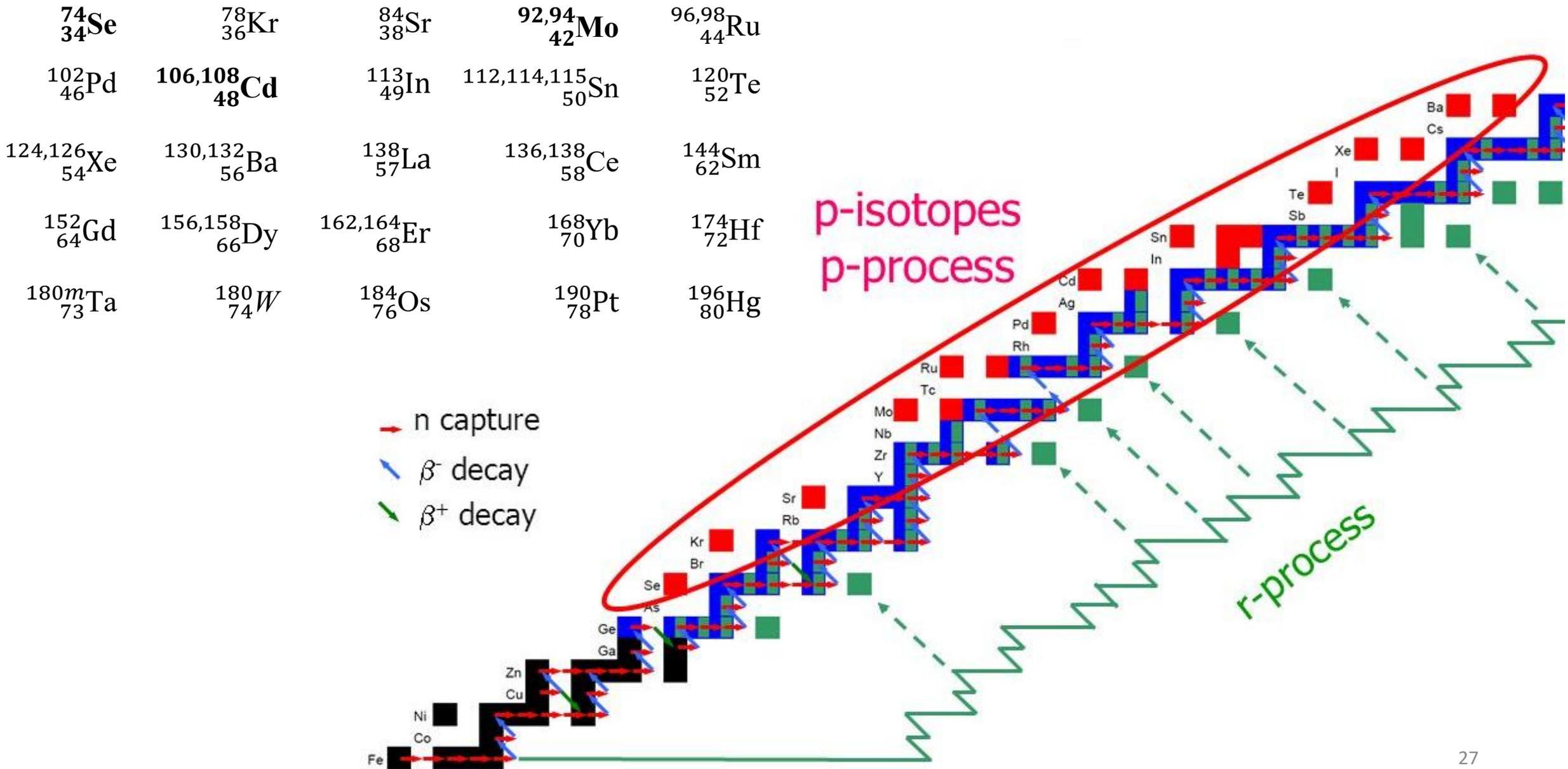


Рис. 14. Относительные выходы фотонейтронных реакций в области ГДР

Обойденные ядра



Исследование разрушения обойденных ядер ^{74}Se и ^{92}Mo

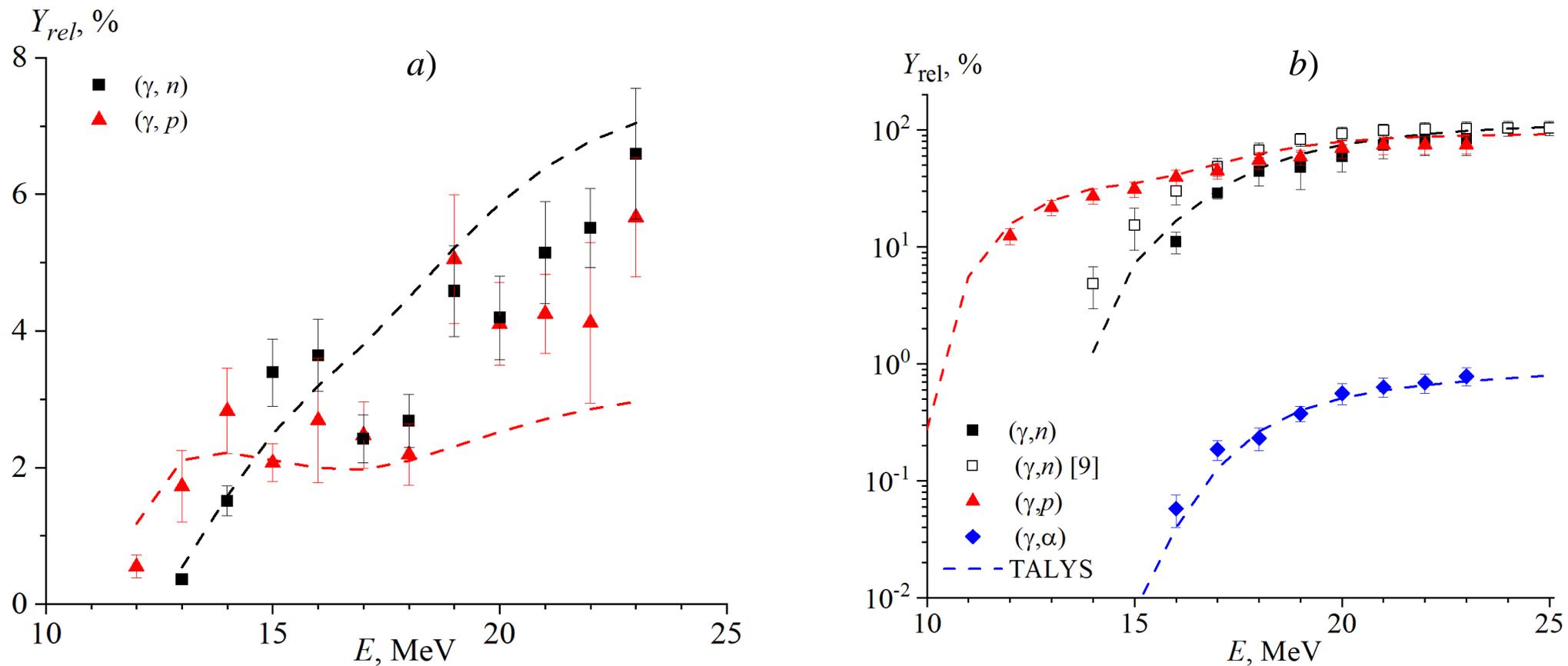


Рис. 17. Относительные выходы фотоядерных реакций в зависимости от конечной энергии тормозного излучения:
 a) на ядре ^{74}Se ; b) на ядре ^{92}Mo

Исследование разрушения обойденного ядра ^{106}Cd

$$\lambda_{TALYS} = \lambda_{\alpha} + \lambda_d + \lambda_n + \lambda_p + \lambda_{2n} + \lambda_{np} + \lambda_{2p}$$

$$\lambda_{corr} = \lambda_{\alpha} + \lambda_d + \frac{\sigma_{qexp}^{nat}(\gamma,n)}{\sigma_{qtheor}^{nat}(\gamma,n)} \lambda_n + \frac{\sigma_{qexp}^{nat}(\gamma,p)}{\sigma_{qtheor}^{nat}(\gamma,p)} \lambda_p + \lambda_{2n} + \lambda_{np} + \lambda_{2p}$$

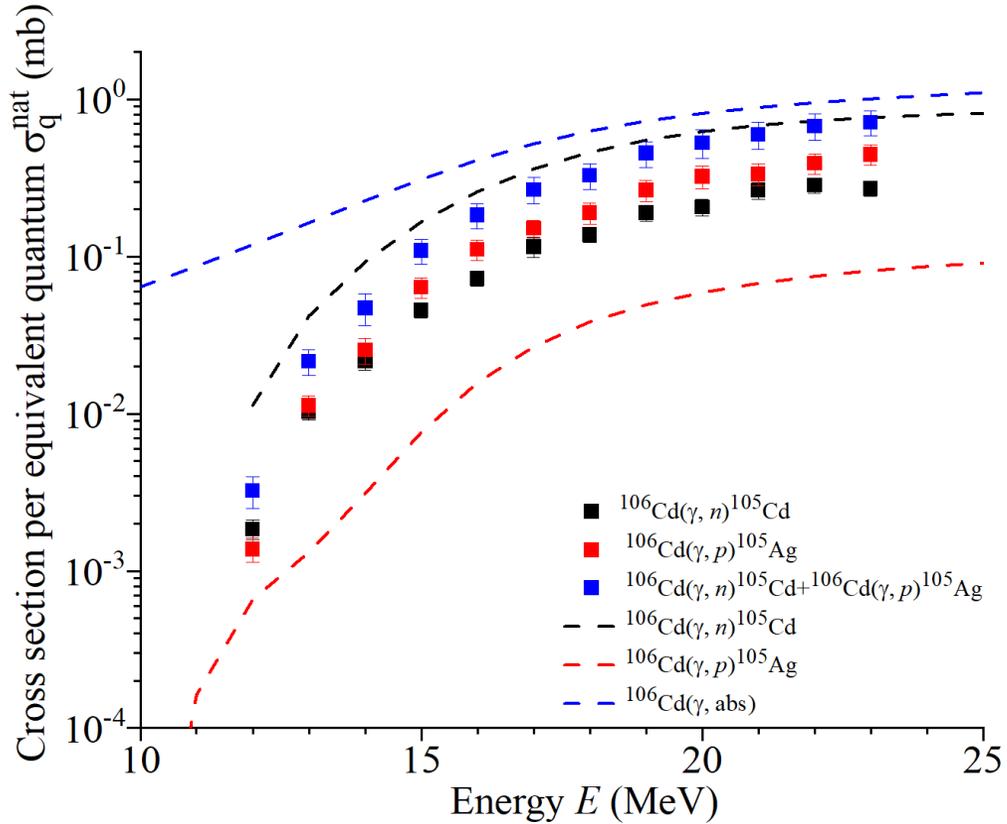


Рис. 18. Сечение на эквивалентный квант для фотоядерных реакций в зависимости от конечной энергии тормозного излучения на ядре ^{105}Cd

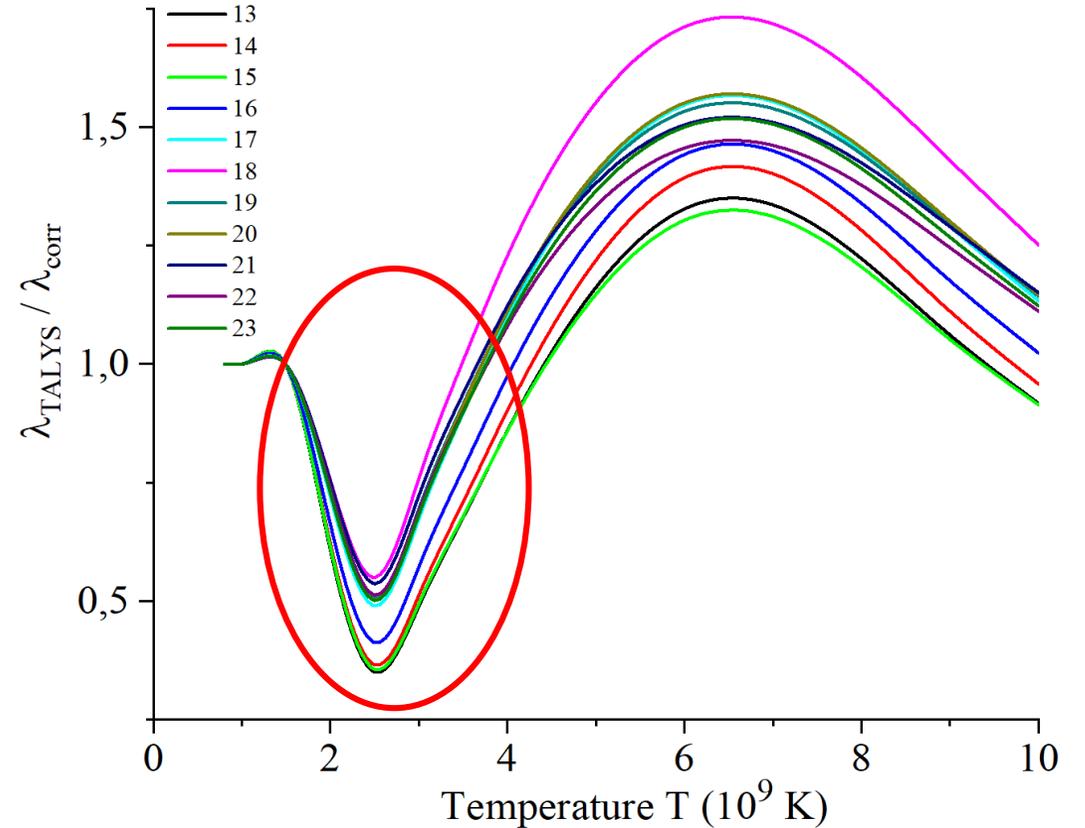


Рис. 19. Отношение скорости фоторасщеплений $\lambda_{TALYS}/\lambda_{corr}$ на ядре ^{105}Cd