

РОЗРАХУНКИ ПЕРЕРІЗІВ РЕАКЦІЙ $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$ ТА $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ 0,002 - 15 MeV ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОДУ EMPIRE II

Р. В. Єрмоленко, І. М. Каденко, В. А. Плюйко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, кафедра ядерної фізики, Київ, Україна

Обчислено та порівняно з експериментальними даними функції збудження реакцій $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$ і $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$. Досліджено вплив на розраховані перерізи реакцій виду дипольної радіаційної силової функції, густини ядерних рівнів, максимальної величини мультипольності γ -переходів, а також внеску передрівноважних процесів і вигляду оптичного потенціалу.

Вступ

Для різноманітних застосувань ядерних констант у науці та техніці потрібні дані з перерізів ядерних реакцій для великої кількості нуклідів. Незважаючи на значний обсяг експериментів, виконаних за декілька останніх десятиріч, деякі дані або погано узгоджуються між собою, або взагалі відсутні [1]. Найбільш виправданим підходом для вирішення проблеми забезпечення ядерними даними є поєднання експериментів, які б гарантували високу надійність ядерних даних, і використання сучасних теоретичних моделей структури ядер та ядерних реакцій для досягнення їх узгодженого опису. Важлива роль при цьому належить дослідженню структури атомних ядер-продуктів ядерних реакцій як в основному, так і у високозбуджених та ізомерних станах, результати вивчення яких дозволяють отримати фундаментальну інформацію про механізми перетворення ядер.

У даній роботі проведено розрахунки перерізів утворення основного та метастабільного станів ядра ^{182}Ta внаслідок радіаційного поглинання нейтронів ядром ^{181}Ta . Необхідно відзначити, що завдяки своїм фізико-хімічним властивостям тантал є важливим конструкційним матеріалом сучасного та майбутнього реакторобудування й тому вкрай необхідним є всебічне знання його властивостей. Крім ядерних реакторів цей матеріал є перспективним щодо його застосування в майбутніх термоядерних реакторах як складової надпровідних магнітів, що можуть втрачати свої властивості внаслідок опромінення в інтенсивних полях нейтронного та γ -випромінювання. Незважаючи на значну потребу в ядерних даних, енергетична залежність перерізів взаємодії ядер ^{181}Ta з нейтронами на сьогодні все ще залишається недостатньо вивченою і є предметом запитів різних наукових центрів на отримання нових даних щодо величин перерізів. При цьому значний інтерес представляє реакція $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$ з утворенням ядра $^{182\text{m}2}\text{Ta}$ в другому метастабільному стані з періодом напіврозпаду 15,84 хв.

Теоретичні розрахунки енергетичної залежності перерізів реакцій $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$ виконувалися за статистичною моделлю ядерних реакцій. Виліт частинок з компаунд-ядра обчислювався методом Хаузера - Фешбаха, а передрівноважна емісія розраховувалася за допомогою екситонної моделі. Усі обчислення виконувалися з використанням програмного пакета EMPIRE II версії 2.19.30 [2]. Вибір пакета EMPIRE II для проведення розрахунків обумовлений тим, що в ньому реалізовано як основні сучасні моделі ядра та ядерних реакцій, так і враховано існуючу базу експериментальних даних (EXFOR) [1] з характеристик низько розташованих рівнів ядер та ймовірностей переходів між ними. Результати теоретичних розрахунків порівнювалися з найновішими експериментальними даними для перерізів дослідженої реакції в широкому діапазоні енергій налітаючих нейтронів [3].

Результати обчислень

На рис.1 і 2 наведено результати розрахунків перерізів утворення основного та метастабільного стану ядра ^{182}Ta в реакції радіаційного поглинання нейтронів при використанні різних моделей радіаційної силової функції [4]. Було враховано лише процеси, що протікають через утворення компаунд-ядра.

При обчисленні дипольної радіаційної силової функції (PCФ) використовувалися моделі: стандартного лоренціану Акселя - Брінка (SLO); підсиленого лоренціану Копецького - Ула (EGLO); модифікованого лоренціану Плюйка (MLO1); фермі-рідини Мухабхаба - Данфорда з узагальненнями Плюйка (GFL) [4]. Можна бачити, що в області низьких енергій результати обчислень за сучасними моделями PCФ, а саме EGLO, MLO, GFL [4 - 6], відрізняються від розрахунків за SLO [4]. Перерізи з використанням SLO лежать вище, ніж у випадках інших моделей PCФ. В області $>1,5$ MeV з'являється

можливість розрядки компаунд-ядра ще через один рівень ядра з великою ймовірністю і тому спостерігається збільшення перерізу. При високих енергіях (більших за 10 MeB) з'являється можливість передрівноважного вильоту частинок, а перерізи розрахунку без врахування такого вильоту виявляються заниженим.

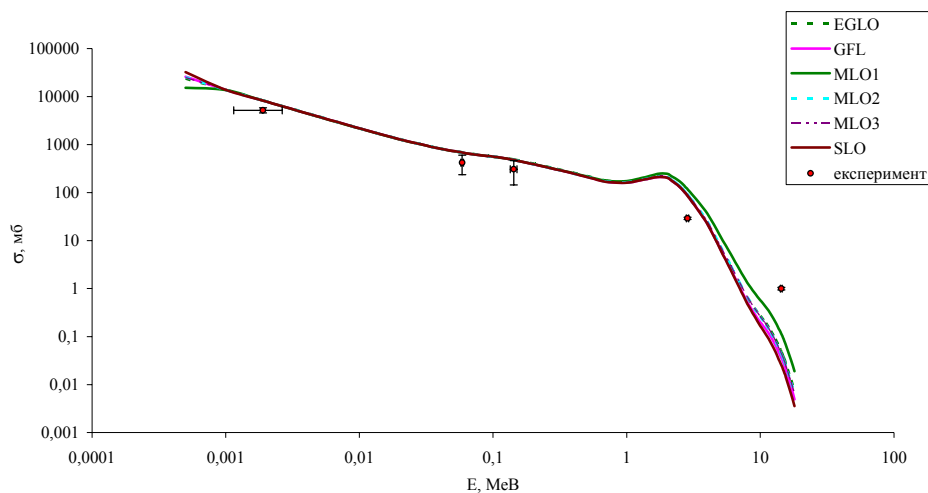


Рис. 1. Енергетична залежність перерізу утворення основного стану ^{182}Ta з різними виразами для радіаційної силової функції. Густина рівнів фіксована за модифікованою (EMPIRE II) моделлю фермі-газу зі спарюванням.

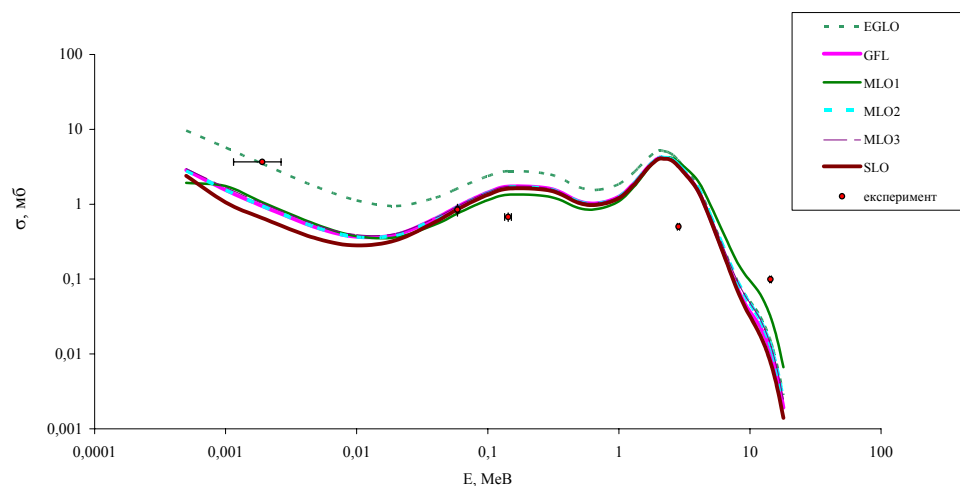


Рис. 2. Енергетична залежність перерізу утворення другого метастабільного стану ядра ^{182}Ta залежно від виразу радіаційної силової функції. Густина рівнів фіксована за модифікованою (EMPIRE II) моделлю фермі-газу зі спарюванням.

В області низьких енергій результати розрахунків є чутливими до форми РСФ. Це пов'язано з суттєвим внеском гамма-квантів, які вилітають із енергією, близькою до енергії відриву нейтрона, тобто саме в тій області, де значення РСФ за різними моделями відрізняються.

Загальний характер залежності відповідає експериментальним результатам [1, 3].

На рис. 3 представлено результати дослідження впливу величини максимального значення мультипольності γ -випромінювання в реакції (n, γ) при розрахунку γ -переходів в неперервній ділянці рівнів. Треба зазначити, що при проведенні розрахунків в області малих енергій необхідно враховувати й октупольні переходи, а γ -випромінювання з $L > 3$ внеску у величину перерізу практично не дає.

На рис. 4 наведено результати розрахунків при використанні моделі радіаційної силової функції EGLO при різних виразах для густини ядерних рівнів, що використовуються в коді EMPIRE II [2]. Можна сказати, що перерізи з утворенням метастабільного стану більш чутливі до вибору густини рівнів у випадку переходів на основний стан. Аналітичні моделі призводять до кращого узгодження з експериментальними даними, хоча і не вдалося описати енергетичну залежність перерізу у всій області енергій при використанні лише одного виразу для густини рівнів.

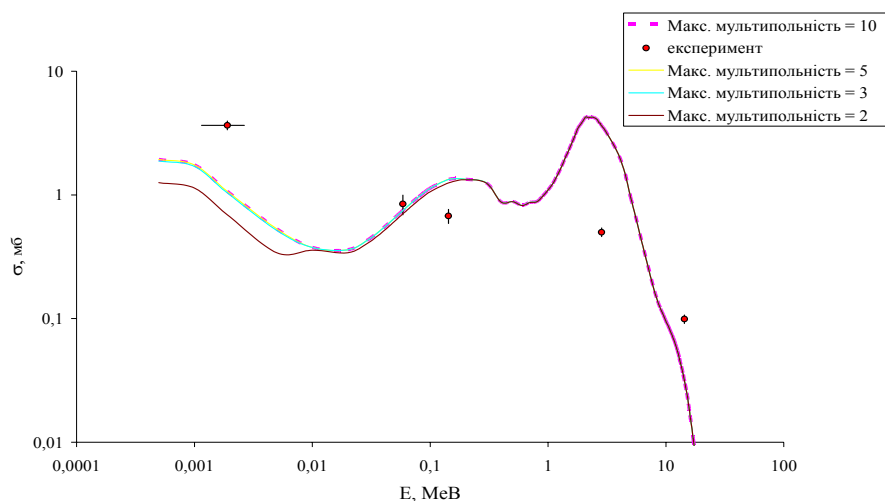


Рис. 3. Енергетична залежність перерізу утворення другого метастабільного стану ^{182}Ta з різними значеннями максимальної мультипольності. Радіаційна силова функція – MLO1.

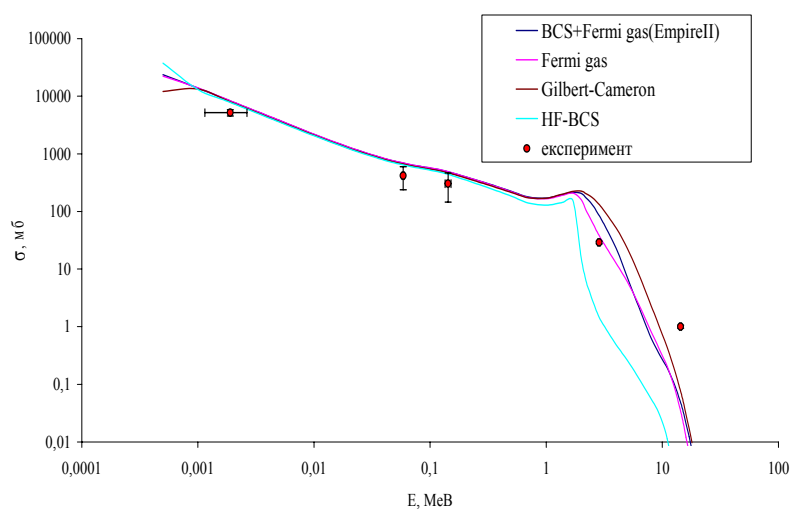


Рис. 4. Енергетична залежність перерізу утворення основного стану ^{182}Ta з різними виразами для густин ядерних рівнів.

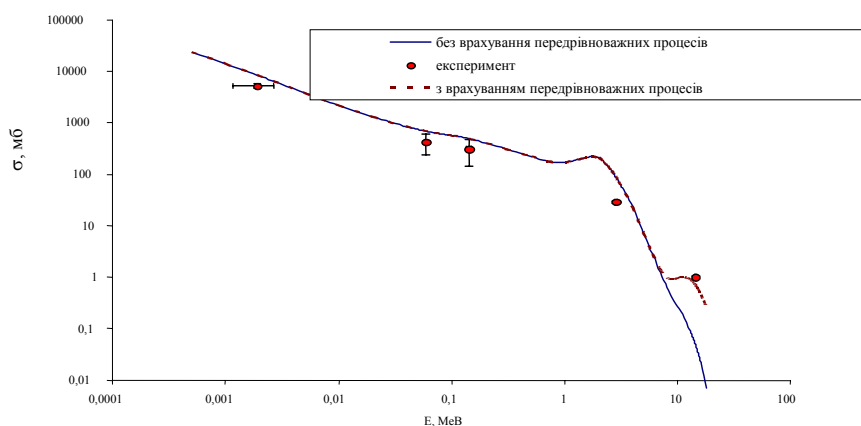


Рис. 5. Енергетична залежність перерізу утворення основного стану ^{182}Ta з та без урахування передрівноважних процесів.

Для визначення впливу передрівноважних процесів на величини досліджуваних перерізів було проведено розрахунки з використанням екситонної моделі. Результати розрахунків, отримані з урахуванням передрівноважного внеску, наведено на рис. 5 і 6. Тут і далі густина рівнів обчислювалася за модифікованою (EMPIRE II) моделлю фермі-газу зі спарюванням; РСФ – модель EGLO.

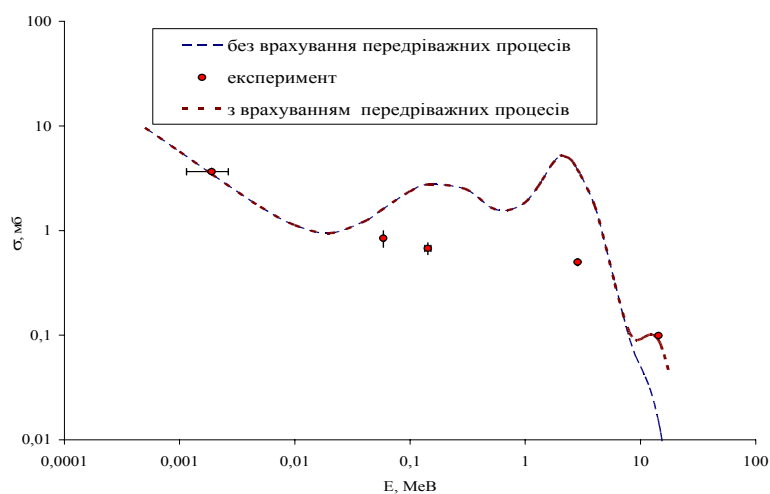


Рис. 6. Енергетична залежність перерізу утворення другого метастабільного стану ^{182}Ta з та без урахування передрівноважних процесів.

Треба відзначити, що врахування передрівноважних процесів є необхідним для опису перерізів реакцій радіаційного поглинання нейтронів з енергією, більшою за 10 MeV.

Для дослідження впливу вибраної моделі оптичного потенціалу на результати обчислень було проведено розрахунки з різними видами оптичних потенціалів взаємодії нейтрона з ядром, а саме: 1) за моделлю Берсіллона [7]; 2) за моделлю Морілона [8]; 3) за моделлю Коенінга [9] (у версії EMPIRE II 2.19.30 цей потенціал використовується як базовий) і 4) за моделлю Вілмора - Ходгсона [10] (цей потенціал був базовим у версії коду EMPIRE-II 2.18). Відзначимо, що параметри всіх оптичних потенціалів отримано з підгонки експериментальних даних із пружного розсіяння нейтронів при енергіях до 20 MeV. Результати розрахунків наведено на рис. 7 - 8.

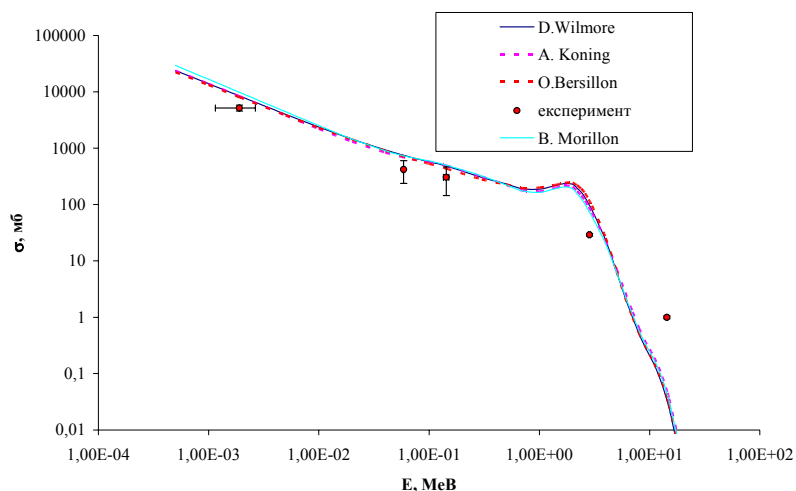


Рис. 7. Енергетична залежність перерізу утворення основного стану ^{182}Ta при використанні різних моделей оптичного потенціалу.

Можна сказати, що обчислені перерізи утворення основного стану ^{182}Ta не залежать від використаної моделі оптичного потенціалу, але така залежність існує при розрахунках перерізів утворення другого метастабільного стану.

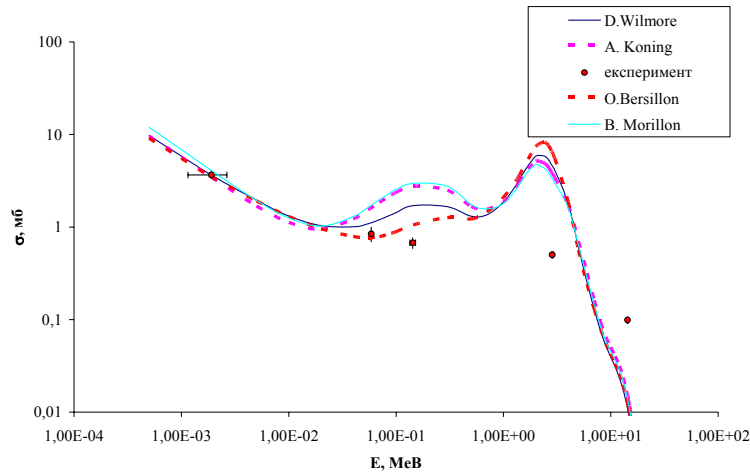


Рис. 8. Енергетична залежність перерізу утворення другого метастабільного стану ^{182}Ta при використанні різних моделей оптичного потенціалу.

Висновки

Результати досліджень перерізів радіаційного поглинання нейтронів важкими ядрами (на прикладі реакції $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$) продемонстрували, що найбільш суттєво на результати обчислення впливає вибір густини рівнів ядер в області енергій більших за 1,5 MeV та радіаційної силової функції в області низьких енергій (менших від 1 MeV). Урахування в розрахунках октупольних γ -переходів дозволяє краще описати експериментальні дані в області енергії до 100 кеВ. В області енергії більше 9 MeV продемонстровано необхідність врахування вильоту γ -квантів до утворення рівноважного стану. При використанні сучасних виразів для радіаційної силової функції, у цілому, результати обчислення узгоджуються з експериментальними даними при енергіях 0,002 - 15 MeV. Найкраще узгодження з експериментальними даними досягається при використанні густини рівнів за модифікованою (EMPIRE II) моделлю фермі-газу зі спарюванням та радіаційних силових функцій EGLO та MLO1. Використання оптичного потенціалу за моделлю Берсіллона дає змогу краще описати енергетичну залежність перерізів радіаційного поглинання нейтронів з утворенням метастабільного стану ^{182}Ta в середній області енергій.

Робота частково підтримана МАГАТЕ (IAEA Research Contract № 12492).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cross section information storage and retrieval system (EXFOR) // National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory, USA. - <http://www.nndc.bnl.gov/index.jsp> (online).
2. Herman M., Oblozinsky P., Capote R. et al. - <http://www.nndc.bnl.gov/empire219>.
3. Kadenko I., Yermolenko R., Gritzay O., Libman V. Determination of cross sections for the reaction $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}^{m2}$ at neutron filtered beams // Book of Abstracts. 5th Conference on Nuclear and Particle Physics (19 - 23 Nov. 2005). - Cairo, 2005. - P. 44.
4. Herman M., Plujko V.A. Gamma-ray strength functions // Reference Input Parameter Library RIPL-2: Handbook for calculations of nuclear reaction data. - IAEA-TEDOC. - 2005. - <http://www-nds.iaea.or.at/ripl2/>.
5. Kopecky J., Uhl M., Chrien R.E. // Phys. Rev. - 193. - Vol. C47. - P. 312.
6. Plujko (Plyuiko) V.A. // Nucl. Phys. - 1999. - Vol. A649. - P. 209c; Acta Phys. Pol. - 2000. - Vol. B31. - P. 435.
7. Bersillon O., Cindro N. // Proc. Fifth Int. Sym. On Interactions of Fast Neutrons with Nuclei. - Gaussig, 1975. - P. 1.
8. Morillon B., Romain P. Dispersive and global spherical optical model with a local energy approximation for the scattering of neutrons by nuclei from 1 KeV to 200 MeV // Phys. Rev. C. - 2004. - Vol. 70. - P. 014601.
9. Koning A.J., Delaroche J.P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV // Nucl. Phys. A. - 2003. - Vol. 713. - P. 231 - 310.
10. Wilmore D., Hodgson P.E. The calculation of neutron cross-sections from optical potentials // Nucl. Phys. - 1964. - Vol. 55. - P. 673 - 694.

**CROSS-SECTION CALCULATIONS FOR $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$ AND $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$ REACTIONS
IN ENERGY RANGE 0.002 - 15 MeV WITHIN EMPIRE II CODE**

R. V. Yermolenko, I. M. Kadenko, V. A. Plujko

The excitation functions of nuclear reactions $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$, $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$ are calculated and compared with experimental data. The effects on calculated cross-sections of a shape of dipole radiative strength function, nuclear level densities, maximal value of gamma-transition multipolarity, as well as pre-equilibrium emission and optical potential form are investigated.

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$ И $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
ДИАПАЗОНЕ 0,002 - 15 МЭВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА EMPIRE II**

Р. В. Ермоленко, И. Н. Каденко, В. А. Плюйко

Вычислены и сравниваются с экспериментальными данными функции возбуждения реакций $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182\text{m}2}\text{Ta}$ и $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182(\text{g}+\text{m}1+\text{m}2)}\text{Ta}$. Исследовано влияние на расчеты вида дипольной радиационной функции, плотности ядерных уровней, максимальной мультипольности γ -переходов, а также вклада предравновесной эмиссии и вида оптического потенциала.