

## АНОТАЦІЯ

**Олейніков Є.В.** Структура масових розподілів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$  біля порогу другого шансу – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (10 – Природничі науки) – Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, 2023.

Дисертацію присвячено комплексним експериментальним та теоретичним дослідженням структури масових розподілів виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , стимульованих гальмівним випромінюванням електронного прискорювача ІЕФ НАН України – мікротрона М-30, біля порогу другого шансу.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, вказано мету, задачі, предмет та об'єкт досліджень. Викладено наукову новизну отриманих результатів та її практичну значимість. Вказано публікації за темою дисертації та наведено дані про апробацію роботи здобувачем. Викладено інформацію про структуру та обсяг дисертаційної роботи, про особистий внесок дисертанта.

Перший розділ «**Фотоподіл актинідів: аналіз експериментальних даних та методів досліджень**» присвячений аналізу наявної літератури по виходам продуктів (уламків), які є одним із основних параметрів, що характеризують процес поділу ядер актинідів та відображають структуру у їх масових розподілах.

Встановлено, що одним із перспективних напрямків вивчення цієї структури є фотоподіл, оскільки взаємодія гамма-квантів з ядрами є цілком електромагнітною, характер якої добре відомий для широкого діапазону енергій. Тому дані про структуру масових розподілів продуктів, які досліджуються у таких реакціях, є найбільш визначеними та мало залежними від модельних уявлень.

У результаті аналізу, встановлено, що існуючі експериментальні дані по виходах продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  при енергіях збудження у околі енергетичного порогу другого шансу є доволі обмеженими. Крім того, окремі експериментальні дані, отримані у різних лабораторіях навіть з використанням однакових методів досліджень, суттєво відрізняються по абсолютним значенням для фіксованих мас уламків (розсіяні відносно один одного), що ускладнює дослідження структури у їх масових розподілах.

Представлено огляд та аналіз методів стимуляції реакції фотоподілу актинідів та отримання експериментальної інформації про виходи продуктів поділу, ідентифікованих за зарядом і масою. У результаті проведеного аналізу встановлено, що для стимуляції реакцій фотоподілу актинідів оптимальним є використання електронних прискорювачів, а саме мікротронів, оскільки, вони завдяки своїм технічним характеристикам (ефективність виводу електронів може становити до 95 %, нестабільність енергії електронів в процесі їх виводу не перевищує 0.04 MeV, можливість плавної зміни початкової енергії електронів) забезпечують інтенсивні потоки гальмівних фотонів для широкого діапазону енергій.

Встановлено, що метод гамма-спектрометрії є одним з найоптимальніших серед відомих методів експериментальних досліджень виходів продуктів поділу та практично основним джерелом надійної інформації про продукти поділу актинідів, ідентифікованих за зарядом і масою. Висока чутливість і роздільна здатність сучасних напівпровідникових детекторів гамма-випромінювання та наявність потужного програмного забезпечення для обробки спектрометричної інформації є переконливим підґрунтям для застосування в експериментальних дослідженнях виходів продуктів поділу актинідів.

Встановлено, що при використанні комп'ютерного моделювання з метою отримання інформації про характеристики пучків гальмівного випромінювання на електронних прискорювачах, що стимулюють реакції фотоподілу актинідів, оптимальним є програмний код Монте-Карло – GEANT4, оскільки дає можливість

отримувати спектри гальмівного випромінювання у максимальному наближенні до реальних умов їх формування.

Для прогнозування виходів продуктів поділу актинідів широко використовуються сучасні напівемпіричні коди GEF і TALYS, розроблені в рамках модифікованої мультимодальної моделі поділу на базі існуючих експериментальних даних. Моделі постійно коригуються та вдосконалюються, щоб давати якомога реалістичніші результати. Однак вони не є універсальними для аналізу структури масових розподілів виходів продуктів фотоподілу для широкого кола актинідів. Тому аналіз існуючих експериментальних даних по масовим розподілам виходів продуктів фотоподілу окремих актинідів у рамках мультигаусової моделі є необхідним для дослідження їх структури, особливо у околі порогу другого шансу.

В другому розділі «**Стимуляція реакції фотоподілу актинідів біля порогу другого шансу на мікротроні М-30**» проведено аналіз факторів, що впливають на характеристики пучків гальмівного випромінювання, утворених на електронних прискорювачах.

Встановлені оптимальні параметри схеми стимуляції реакції фотоподілу зразків актинідів на електронному прискорювачі – мікротроні М-30 при граничній енергії гальмівних фотонів – 17.5 МеВ у результаті проведених теоретичних розрахунків з використанням інструментарію GEANT4, що забезпечують максимальний вміст фотонів при мінімальному вмісті залишкових електронів і фотонейтронів у пучках гальмівного випромінювання. При розрахунках були враховані ядерно-фізичні та геометричні розміри складових елементів схеми активації (конвертори, фільтри, опромінювані зразки актинідів), їх розташування у трьох мірному просторі та конструктивні особливості вузла виводу електронів мікротрону М-30.

Було досліджено внесок супутніх ядерних реакцій, а саме електро- та нейтронного поділу, у фотоподіл актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  при їх активації на електронному прискорювачі – мікротроні М-30 для фіксованої початкової енергії електронів 17.5 МеВ у результаті проведених симуляцій. Результати розрахунків

підтвердили ефективність використання запропонованої схеми стимуляції фотоподілу актинідів на мікротроні М-30 для дослідження їх характеристик.

Встановлені значення порогів другого шансу фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , у результаті проведених теоретичних розрахунків за допомогою програмних пакетів TALYS і GEF, які узгоджуються між собою та корелюють зі значеннями існуючих експериментальних даних.

У результаті проведених теоретичних розрахунків з використанням інструментарію GEANT4, і власноруч створеною комп'ютерною програмою «NPMA Bremsstrahlung simulator version 1.1.2110» були встановлені значення усереднених енергій збудження подільних ядер  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  при фотоактивації на мікротроні М-30 для випадку оптимальної схеми стимуляції. Встановлені значення усереднених енергій збудження використовувалися для коректного порівняння з існуючими експериментальними даними.

У третьому розділі **«Експериментальні дослідження виходів продуктів фотоподілу актинідів на мікротроні М-30»** детально описано процес проведення експериментальних досліджень виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  та  $^{239}\text{Pu}$  на електронному прискорювачі – мікротроні М-30, а саме, підготовку подільних мішеней до опромінення, їх активацію, виміри гамма-випромінювання від продуктів фотоподілу та математичної обробки накопиченої спектрометричної інформації. Наведені технічні характеристики мікротрону М-30, напівпровідникових HPGe- і Ge(Li)- детекторів, та використаних зразків актинідів.

Описано експериментальну методику дослідження відносних кумулятивних виходів продуктів фотоподілу актинідів, яка базується на гамма-спектрометричних вимірах на напівпровідникових Ge(Li)- і HPGe- детекторах з високою роздільною здатністю, що дозволяє проводити з високою точністю і надійністю ідентифікацію уламків поділу по заряду і масі. При використанні вказаної методики використовується техніка “збору уламків” (“catcher foil” technique) алюмінієвою фольгою, яка встановлюється безпосередньо перед шаром подільного матеріалу (актиноїду) та дозволяє проводити процес

накопичення уламків під час стимуляції реакції поділу актинідів, з подальшими спектрометричними вимірюваннями їх гамма-активності у режимі “offline”.

Описано спосіб калібрування з використанням гамма-випромінювання від продуктів фотоподілу актинідів, при визначенні залежності ефективності HPGe- і Ge(Li)- детекторів від енергії, що дозволяє спростити процес калібрування та підвищити точність і надійність результатів вимірів за рахунок коректного врахування поправок, які залежать від геометричних розмірів детекторів і досліджуваних зразків, а також від самопоглинання гамма-квантів у зразках.

При визначенні повних кумулятивних виходів продуктів, з врахуванням їх розподілів по ізобарним ланцюжкам фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  та  $^{239}\text{Pu}$ , використані чисельні значення розрахунків проведених на власноруч створеному оптимізованому параметричному описанні (емпіричної моделі) залежності виходів миттєвих нейтронів від маси уламків (зменшена кількість параметрів у порівнянні з існуючими на теперішній час емпіричними моделями), що забезпечує достовірність отриманих результатів.

На основі розробленої емпіричної моделі створені комп'ютерні програми “NPMA Prompt neutron yield version 1.0.2301” і “NPMU Prompt neutron parametrization version 1.0.2302” для проведення рутинних розрахунків нейтронної множинності – повного виходу миттєвих нейтронів та їх залежності від мас уламків.

У четвертому розділі «**Дослідження структури масових розподілів продуктів фотоподілу актинідів**» представлені отримані експериментальні дані відносних кумулятивних виходів продуктів та повних виходів ізобарних масових ланцюжків, утворених у результаті фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$ , при граничній енергії гальмівного випромінювання 17.5 MeV: для  $^{232}\text{Th}$  – значення 23 продуктів (**17 отримані вперше**), з яких знайдені повні виходи 22 ізобарних масових ланцюжків; для  $^{238}\text{U}$  – значення для 29 продуктів (**14 отримані вперше**), з яких знайдені повні виходи 26 ізобарних масових ланцюжків та для  $^{239}\text{Pu}$  – значення 13 продуктів (**усі отримані вперше**), з яких знайдені повні виходи 13 ізобарних масових ланцюжків.

Отримані експериментальні значення кумулятивних та повних виходів продуктів, при фотоподілі  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$  при граничній енергії гальмівних фотонів 17.5 MeV внесені у міжнародну базу експериментальних даних – EXFOR.

Проведені теоретичні розрахунки виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  за допомогою програмних пакетів TALYS і GEF та здійснено порівняння з експериментальними значеннями. Встановлено, що теоретичні розрахунки якісно узгоджуються між собою і відображають лише форму масових розподілів характерну для отриманих експериментальних даних.

Модифіковано модель мультигаусового описання спектрів масових розподілів виходів асиметричних продуктів фотоподілу актинідів, шляхом введення додаткового гауса, та використано для описання спектрів масових розподілів виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$ . Запропонований підхід підтверджує наявність 3-ох піків тонкої структури у спектрах їх масових розподілів в околі мас 133–134, 138–139 і 143–144, які пов'язані з впливом ядерних оболонок та парністю зарядів уламків.

В рамках дослідження структури масових розподілів виходів продуктів фотоподілу актинідів, розраховані залежності виходів уламків від маси, заряду (елементний) та кількості нейтронів (ізотонний) для подільних ядер  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$ , використовуючи GEF код. Отримані результати підтверджують наявність структури масових розподілів (підвищених виходів продуктів у околі вищезгаданих мас) та вплив ядерних оболонок (протонних і нейтронних) на формування виходів уламків фотоподілу актинідів.

Отримані результати необхідні для тестування існуючих теоретичних моделей та параметричних описань залежності виходів продуктів фотоподілу актинідів від їх мас при фіксованих значеннях енергій збудження.

**Ключові слова:** фотоядерні реакції, фотоподіл,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , вихід продуктів поділу, переріз реакції, метод активації, мікротрон, утворення гальмівного випромінювання, випромінювання, гамма-спектр, нейтрони, GEANT4, GEF, TALYS

## SUMMARY

***Oleinikov E.V. Structure of mass distribution of actinide photofission fragments near second chance.*** – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis is submitted to acquire the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 104 “Physics and Astronomy” – Institute of Electron Physics NAS Ukraine, Uzhhorod, 2023.

The dissertation is devoted to comprehensive experimental and theoretical studies of the structure of mass distributions of the photofission products of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  stimulated by the bremsstrahlung radiation of the electron accelerator IEP of the National Academy of Sciences of Ukraine - microtron M-30, near the threshold of the second chance.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation's chosen topic and indicates the research's purpose, tasks, subject, and object. The scientific novelty of the obtained results and their practical significance are outlined. Publications on the dissertation topic are indicated, and data on the approbation of the work by the applicant are given. Information about the structure and scope of the dissertation work and the personal contribution of the dissertation worker is presented.

The first chapter, “**Photofission of actinides: analysis of experimental data and research methods,**” is devoted to the analysis of available literature on the yields of products (fragments), which are one of the main parameters characterizing the fission process of actinide nuclei and reflect the structure in their mass distributions.

It has been established that one of the promising areas of study of this structure is photofission since the interaction of gamma quanta with nuclei is entirely electromagnetic, the nature of which is well-known for a wide range of energies. Therefore, the data on the structure of product mass distributions studied in such reactions are the most determined and are little dependent on model representations.

As a result of the analysis, it was established that the existing experimental data on the yields of the actinide photofission products  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  at excitation energies around the energy threshold of the second chance are quite limited. In addition, individual experimental data obtained in different laboratories, even using the

same research methods, differ significantly in absolute values for fixed masses of fragments (scattered relative to each other), complicating the study of the structure in their mass distributions.

An overview and analysis of methods for stimulating the photofission reaction of actinides and obtaining experimental information about the yields of fission products, identified by charge and mass, are presented. As a result of the conducted analysis, it was established that the use of electron accelerators, namely microtrons, is optimal for stimulating actinide photofission reactions due to their technical characteristics (the efficiency of electron output can be up to 95%, the instability of electron energy does not exceed 0.04 MeV, the possibility of smooth change of the initial energy of electrons) provides intense streams of bremsstrahlung photons for a wide range of energies.

It has been established that the gamma spectrometry method is one of the most optimal among the known methods of experimental studies of the yields of fission products. It is practically the primary source of reliable information about fission products of actinides identified by charge and mass. Modern semiconductor gamma radiation detectors' high sensitivity and resolution and the availability of powerful software for processing spectrometric information are significant advantages for their use in experimental studies of actinide fission product yields.

It has been established that when using computer modeling to obtain information about the characteristics of bremsstrahlung beams at electronic accelerators that stimulate photofission reactions of actinides, the Monte Carlo program code GEANT4 is optimal, as it makes it possible to obtain bremsstrahlung spectra as close as possible to actual conditions of their formation.

Modern semi-empirical GEF and TALYS codes, developed within the framework of a modified multimodal fission model based on existing experimental data, are widely used to predict the yields of actinide fission products. The models are constantly adjusted and improved for the most realistic results possible. However, they are not universal for analyzing the structure of the mass distributions of photofission product yields for a wide range of actinides. Therefore, the analysis of existing experimental data on the mass distributions of photofission products of individual actinides within the framework of



the multi-Gaussian model is necessary to study their structure, especially around the second chance threshold.

In the second chapter, **“Stimulation of the photodissociation reaction of actinides near the threshold of the second chance at the M-30 microtron,”** an analysis of factors affecting the characteristics of bremsstrahlung beams formed at electron accelerators was carried out.

The optimal parameters of the stimulation scheme for the photofission reaction of actinide samples on the M-30 microtron electron accelerator at the maximum energy of bremsstrahlung photons of 17.5 MeV were determined as a result of theoretical calculations using the GEANT4 toolkit, which ensure the maximum number of photons with the minimum number of residual electrons and photoneutrons in the beams of bremsstrahlung radiation. The calculations took into account the nuclear-physical and geometric characteristics of the activation scheme components (converters, filters, irradiated actinide samples), their location in three-dimensional space, and the structural features of the M-30 microtron electron output node.

The contribution of accompanying nuclear reactions, namely electron and neutron fission, to the photofission of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  during their activation at the electron accelerator - microtron M-30 for a fixed initial electron energy of 17.5 MeV was investigated in the result of the simulations. The results of the calculations confirmed the effectiveness of using the proposed actinide photofission stimulation scheme on the M-30 microtron to study their characteristics.

The second-chance threshold values of photofission of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  were established as a result of theoretical calculations using the TALYS and GEF software packages, which are consistent with each other and correlated with the values of existing experimental data.

As a result of theoretical calculations using the GEANT4 toolkit and the self-created computer program “NPMA Bremsstrahlung simulator version 1.1.2110”, the values of the averaged excitation energies of photo-activation of fissile nuclei  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  on the M-30 microtron were determined for the case of optimal

stimulation schemes. The determined values of the averaged excitation energies were used for correct comparison with existing experimental data.

The third chapter, **“Experimental studies of photofission product yields of actinides on the M-30 microtron,”** describes in detail the process of conducting experimental studies of the photofission products of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  on the electron accelerator - the M-30 microtron, namely, the preparation of fission targets to irradiation, their activation, measurements of gamma radiation from the products of photofission and mathematical processing of acquired spectrometric information. The technical characteristics of the M-30 microtron, semiconductor HPGe and Ge(Li) detectors, and the used actinide samples are given.

An experimental method of studying the relative cumulative yields of actinide photofission products is described, which is based on gamma-spectrometric measurements on semiconductor Ge(Li)- and HPGe-detectors with high resolution, that allows for the identification of fission fragments by charge and mass with high accuracy and reliability. When using the indicated technique (the “catcher foil” technique), the aluminum foil is used, which is installed directly in front of the layer of fissile material (actinide) and allows the accumulation of fragments during the stimulation of the actinide fission reaction, with subsequent spectrometric measurements of their gamma activities in "offline" mode.

A method of calibration using gamma radiation from actinide photofission products with the determined dependence of the efficiency of HPGe and Ge(Li) detectors on energy is described, which simplifies the calibration process and increases the accuracy and reliability of measurement results due to the correct consideration of corrections that depend on geometric dimensions of the detectors and the studied samples, as well as from the self-absorption of gamma quanta in the samples.

When determining the total cumulative yields of the products, taking into account their distribution along isobaric chains from the photofission of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$ , the numerical values of the calculations carried out on the self-created optimized parametric description (empirical model) of the dependence of the prompt neutron yields on the fragment mass (reduced amount of parameters in comparison

with currently existing empirical models) we used, which ensures the reliability of the obtained results.

Based on the developed empirical model, the computer programs “NPMA Prompt neutron yield version 1.0.2301” and “NPMU Prompt neutron parametrization version 1.0.2302” were created for routine calculations of neutron multiplicity - the total yield of instantaneous neutrons and their dependence on the fragment mass.

The fourth chapter, “**Investigation of the structure of mass distributions of actinide photofission products,**” presents the obtained experimental data of relative cumulative product yields and total yields of isobaric mass chains formed as a result of photofission of actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$ , at the maximum energy of bremsstrahlung radiation 17.5 MeV: for  $^{232}\text{Th}$  – values of 23 products (**17 obtained for the first time**), from which total yields of 22 isobaric mass chains were found; for  $^{238}\text{U}$  - values for 29 products (**14 obtained for the first time**), from which total yields of 26 isobaric mass chains were found, and for  $^{239}\text{Pu}$  - values for 13 products (**all obtained for the first time**), from which total yields of 13 isobaric mass chains were found.

The obtained experimental values of the cumulative and total yields of products of the photofission of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  at the maximum energy of bremsstrahlung photons of 17.5 MeV are published in the international database of experimental data – EXFOR.

Theoretical calculations of the yields of actinide photofission products  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  were carried out using the TALYS and GEF software packages, and a comparison was made with experimental values. It was established that the theoretical calculations are qualitatively consistent with each other and reflect only the form of mass distributions characteristic of the obtained experimental data.

The multi-Gaussian description model of the mass spectra of the photofission product yields of actinides was modified by introducing an additional Gaussian and was used to describe the mass spectra of photofission yield products of the actinides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$ . The proposed approach confirms the presence of 3 fine structure peaks in the spectra of their mass distributions around masses 133–134, 138–139, and

143–144, which are associated with the influence of nuclear shells and the evenness of the charges of the fragments.

As part of the study of the mass distribution structure of actinide photofission product yields, the dependences of the fragment yields on the mass, charge (elemental), and number of neutrons (isotonic) for fissile nuclei  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{239}\text{Pu}$  were calculated using the GEF code. The obtained results confirm the existence of a structure of mass distributions (increased yields of products in the vicinity of the masses mentioned above) and the influence of nuclear shells (proton and neutron) on forming yields of actinide photofission fragments.

The obtained results are necessary for testing the existing theoretical models and parametric descriptions of the dependence of the yields of actinide photodissociation products on their masses at fixed values of excitation energies.

**Keywords:** photonuclear reactions, photofission,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , yield of fission products, reaction cross section, activation method, microtron, production of bremsstrahlung, radiation, gamma spectrum, neutrons, GEANT4, GEF, TALYS

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, **Є.В. Олейников**, “Моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів, індукованих гальмівним випромінюванням електронних прискорювачів”, *Наук. Вісн. Ужг. Унів. Сер. Фіз.*, вип. 42, сс. 169-177, 2017, doi: 10.54919/2415-8038.2017.42.169-177.
2. О.О. Parlag, V.T. Maslyuk, **E.V. Oleynikov**, I.V. Pylypchynets, A.I. Lengyel, “Structure of Mass-Yield Distributions of  $^{232}\text{Th}$  Photofission Product by Bremsstrahlung at Energy 17.5 MeV”, *Sci. Her. Uzhh. Univ. Ser Phys.*, vol. 49, pp. 54-60, 2021, doi: 10.54919/2415-8038.2021.49.54-60. **(SCOPUS, Q4)**
3. О.О. Parlag, V.T. Maslyuk, **E.V. Oleynikov**, I.V. Pylypchynets, A.I. Lengyel, “Product yields for the photofission of  $^{239}\text{Pu}$  with bremsstrahlung at 17.5 MeV boundary energy”, *Probl. At. Sci. and Technol.*, vol. 136, no. 6, pp. 8-12, 2021, doi: 10.46813/2021-136-008. **(SCOPUS, Q4)**
4. **E.V. Oleynikov**, O.O. Parlag, I.V. Pylypchynets, V.T. Maslyuk, O.I. Lengyel, “Structure of mass distributions of photofission product yields of  $^{238}\text{U}$  at 17.5 MeV bremsstrahlung energy”, *Probl. At. Sci. and Technol.*, vol. 145, no. 3, pp. 26-32, 2023, doi: 10.46813/2023-145-026. **(SCOPUS, Q4)**
5. **E. Oleinikov**, O. Parlag, I. Pylypchynets, “Simulation of the Optimal Scheme for Stimulating Actinide Photofission on the M-30 Microtron at 17.5 MeV Bremsstrahlung Energy”, *J. Nucl. and Part. Phys.*, vol. 13, no. 1, pp. 7-16, 2023, doi: 10.5923/j.jnpp.20231301.02.
6. **E.V. Oleinikov**, A.I. Lengyel, O.O. Parlag, V.T. Maslyuk, I.V. Pylypchynets, “Parameterization of prompt neutron multiplicity for first-chance actinide photofission”, *SCIRESA J. Phys.*, vol. 8, no. 5, pp. 470-487, 2023, doi: 10.54647/physics140574.
7. **E. Oleinikov**, O. Parlag, I. Pylypchynets, “Simulation of the Concomitant Nuclear Reactions Contribution to the Actinide Photofission on the M-30

Microtron at 17.5 MeV Bremsstrahlung Energy”, *J. Nucl. and Part. Phys.*, vol. 13, no. 2, pp. 17-23, 2023, doi: 10.5923/j.jnpp.20231302.01

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

1. **Є.В. Олейников**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Контроль параметрів пучка гальмівного випромінювання при стимуляції реакції фотоподілу ядер актинідів на мікротроні М-30”, у *Мат. Конф. ІЕФ-2019 Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір.*, Ужгород, 21-24 травня 2019, сс. 85-86.
2. **Є.В. Олейников**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, В.Т. Маслюк, Лендел, Й.Й. Гайніш, Г.Ф. Пітченко, А.Н. Турховський, “Контроль параметрів пучка шальмівного випромінювання при стимуляції реакції фотоподілу ядер актинідів” у *Тези Доп. 17ої Конф. Фіз. Вис. Енергій та Яд. Фіз.*, Харків, 26-29 травня, 2019, с. 40
3. О.О. Парлаг, В.Т. Маслюк, **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.І. Лендел, Й.Й. Гайніш, “Формування пучків високоенергетичних фотонів двохшаровою мішенню ( $Ta+B_4C$ ) на мікротроні М-30 для стимуляції реакції фотоподілу актинідів”, у *Тези 18ої Конф. Фіз. Вис. Енергій та Яд. Фіз.*, Харків, 24-27 березня 2020, с. 48.
4. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.І. Лендел, О.О. Парлаг, “Вплив енергії збудження на формування пост-нейтронних виходів продуктів поділу ізотопів торію в області енергій першого шансу”, у *Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір. ІЕФ-2021*, Ужгород, 26-28 травня 2021, сс. 171-172.
5. І.В. Пилипчинець, **Є.В. Олейніков**, О.О. Парлаг, О.І. Лендел, “Симуляція параметрів пучків гальмівного випромінювання при взаємодії електронів з танталовим конвертером на мікротроні М-30”, у *Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір. ІЕФ-2021*, Ужгород, 26-28 травня 2021, сс. 117-118.
6. О.О. Parlag, V.T. Maslyuk, **E.V. Oleynikov**, I.V. Pylypchynets, A.I. Lengyel, “Product yields for the photofission of  $^{239}\text{Pu}$  with bremsstrahlung at 17.5 MeV

- boundary energy”, in *Abstr. 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Charged Part. Accel.*, Kharkiv, Sept. 21–24, 2021, pp. 68-69.
7. A.I. Lengyel, **E.V.Oleynikov**, I.V. Pylypchynec, O.O. Parlag, V.T. Maslyuk, “Parameterization of neutron yields for first chance photofission fragments”, in *28<sup>th</sup> Int. Seminar on Interact. of Neutrons with Nuclei. Collection of Abstr.*, Xi’an, China, May 24-28, 2021, p. 111.
  8. O.O. Парлаг, **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.І. Лендел, О.А. Тарнай, “Моделювання ефективності ослаблення пучка високоенергетичних електронів танталом”, у *Тези Доп. 19ої Конф. Фіз. Вис. Енергій та Яд. Фіз.*, Харків, 2021, с. 76.
  9. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, “Симуляція спектрів гальмівного випромінювання для мікротрону М-30 інструментарієм GEANT4”, у *28й Щорічній Наук. Конф. Інст. Яд. Досл. НАН Укр.*, Київ, 27 вересня, 2021, сс. 132-133.
  10. A. Lengyel, O. Parlag, **E. Oleinikov**, I. Pylypchynets, “Simulation of prompt neutron multiplicity for  $^{236-244}\text{Pu}$  isotopes photofission at energy region of first chance” in *Innov. and Prospects of World Sci. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Sci. and Pract. Conf. Perfect Publishing*. Vancouver, Canada, 2022, pp. 333-341.
  11. **E. Oleinikov**, I. Pylypchynets, A. Lengyel, O. Parlag, “Calculation of average number of prompt neutrons for  $^{236-244}\text{Pu}$  isotopes photofission at energy regions of first chance”, in *Proc. 17<sup>th</sup> Int. Sci. and Practical Conf. "Multidisciplinary Academic Notes. Theory, Methodology And Practice"*, Tokyo, Japan, May 3-6, 2022, pp. 874-878, doi: 10.46299/ISG.2022.1.17
  12. **E. Oleinikov**, I. Pylypchynets, P. Derechkey, O. Parlag, “Photofission cross sections of  $^{236-244}\text{Pu}$  isotopes for photon energies up to 20 MeV”, in *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Sci. and Pract. Conf. "Theoretical and science bases of actual tasks"*, Lisbon, Portugal, April 12-15, 2022, pp. 482-486, doi: 10.46299/ISG.2022.1.14
  13. І.В. Пилипчинець, **Є.В. Олейніков**, П.С. Деречкей, О.О. Парлаг, “Перерізи реакцій мультишансового поділу ізотопів плутонію  $^{236-244}\text{Pu}$  для області енергій

- фотонів до 20 MeV”, у *Тези Доп. 20ої Конф. Фіз. Вис. Енергій та Яд. Фіз.*, Харків, липень 2022, сс. 32-33, doi: 10.13140/RG.2.2.17673.11361
14. І.В. Пилипчинець, **Є.В. Олейніков**, О.О. Парлаг, “Моделювання виходів уламків фотоподілу ізотопів плутонію  $^{236-244}\text{Pu}$  для області енергій першого шансу”, у *Тези Доп. 20ої Конф. Фіз. Вис. Енергій та Яд. Фіз.*, Харків, липень 2022, с. 33, doi: 10.13140/RG.2.2.17673.11361
  15. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Комп’ютерна Симуляція Поглинальних Характеристик  $\text{V}_4\text{C}$  до Компонент Спектру Гальмівного Випромінювання Мікротрона М-30” у *Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір.. ІЕФ-2023. Мат. Конф.*, Ужгород, 15-18 травня, 2023, сс. 21-22.
  16. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Вплив Енергії Збудження На Формування Фрагментів Фотоподілу  $^{238}\text{U}$  Для Першого Шансу” у *Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір.. ІЕФ-2023. Мат. Конф.*, Ужгород, 15-18 травня, 2023, сс. 42-43.
  17. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, “Вплив енергії збудження на формування виходів уламків фотоподілу ізотопів плутонію в області енергій першого шансу”, *Збірник Мат. Ювіл. Конф. “30 років Інституту електронної фізики Національної академії наук України”*, Ужгород, Україна, 21-23 вересня, 2022, сс. 236-237.
  18. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Комп’ютерна симуляція поглинальних характеристик  $\text{V}_4\text{C}$  до компонент спектру гальмівного випромінювання мікротрона М-30”, у *Мат. Конф. ІЕФ-2023 Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір.*, Ужгород, 15-18 травня 2023, сс. 21-22.
  19. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Вплив енергії збудження на формування фрагментів фотоподілу  $^{238}\text{U}$  для першого шансу”, у *Мат. Конф. ІЕФ-2023 Міжн. Конф. Мол. Вч. та Аспір.*, Ужгород, 15-18 травня 2023, сс. 42-43.
  20. **E.V. Oleinikov**, A.I. Lengyel, O.O. Parlag, I.V. Pylypchynets, “Simulation of the neutron multiplicity of photofission of actinide nuclei for the energies of first chance”, in *Abstr. Rep. 21<sup>st</sup> Conf. High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, Kharkiv, 2023, p. 130.



21. **E.V. Oleinikov**, A.I. Lengyel, O.O. Parlag, I.V. Pylypchynets, V.T. Maslyuk, “Structure of mass distributions of  $^{238}\text{U}$  photofission product yields at 17.5 MeV bremsstrahlung photons energy”, in *Abstr. Rep. 21<sup>st</sup> Conf. High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, Kharkiv, 2023, p. 23.
22. **Є.В. Олейніков**, О.І. Лендел, О.О. Парлаг, І.В. Пилипчинець, “Комплекс програм для параметричного описання нейтронної множинності першого шансу фотоподілу актинідів”, у *Наук. Праці. Міжн. Конф. “Резонансні явища в атомних системах”*, Ужгород, 19-21 вересня, 2023, pp. 133-138.
23. **Є.В. Олейніков**, О.І. Лендел, О.О. Парлаг, І.В. Пилипчинець, “Мультигаусове описання структури масових розподілів продуктів поділу актинідів гальмівними фотонами біля порогу другого шансу”, у *Наук. Праці. Міжн. Конф. “Резонансні явища в атомних системах”*, Ужгород, 19-21 вересня, 2023, pp. 167-173.

*Свідоцтва про реєстрацію авторських прав:*

1. **Є.В. Олейніков**, О.І. Лендел, О.О. Парлаг, І.В. Пилипчинець, “Комп’ютерна програма «NPMA Prompt neutron yield version 1.0.2301»”, Укр. Патент Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 120663, 20 липня, 2023.
2. **Є.В. Олейніков**, О.І. Лендел, О.О. Парлаг, І.В. Пилипчинець, “Комп’ютерна програма «NPMU Prompt neutron parametrization version 1.0.2302»”, Укр. Патент Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 120664, 20 липня, 2023.
3. **Є.В. Олейніков**, І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, “Комп’ютерна програма «NPMA Bremsstrahlung simulator Version 1.1.2110»”, Укр. Патент Авторське свідоцтво 113402, 21 червня, 2022.