

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Поп Оксани Михайлівни* на тему “СТАНДАРТНІ МНОЖИНИ НУКЛІДІВ ПРИРОДНИХ РЯДІВ Th, U ДЛЯ ЗАДАЧ ЯДЕРНОГО ДАТУВАННЯ: МЕТОД СТАТИСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ”, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук по спеціальності 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

Актуальність теми дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Поп О.М. присвячена вивченню радіоактивних перетворень ядер природних рядів урану-торію та нептунію, продукти яких формують склад земної кори та космічних об'єктів. Оскільки періоди напіврозпаду материнських ізотопів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$ співрозмірні з часом існування Землі, то продукти їх розпаду є основою формування хімічного складу Земної кори. Це пояснює інтерес до фізики ядерних перетворень цих радіонуклідів та до вивчення особливостей часової еволюції нуклідних спектрів зразків доквілля. Дані таких досліджень важливі, як для фундаментальних задач фізики нуклеосинтезу, так і ряду застосувань, наприклад, в задачах ідентифікації чи ядерного датування зразків доквілля. Важливим також є аналіз сучасного стану баз ядерно-фізичних констант, які використовуються та, відповідно, формують часові залежності активностей продуктів розпаду рядів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$.

Відомо, що на сьогодні поширеними методами ядерного датування є так звані ядерні хронометри, що базуються на дослідженні співвідношень кількостей, або активностей вибраних пар материнських / дочірніх, або дочірніх / дочірніх ядер. Такі методи, орієнтовані на отримання фіксованих, або точкових оцінок віку подій, які суттєво залежать від підбору досліджуваних пар нуклідів, вибору моделі ядерних перетворень та похибок експерименту. Покращення точності ядерного датування реалізують у методі «ізохрон», при поєднанні даних 2-х різних відношень материнських / дочірніх елементів та достатнього масиву одновікових досліджуваних зразків.

Рецензована дисертаційна робота О.М. Поп присвячена побудові та вивченню структури множин нуклідів (стандартних, не стандартних та повних) природних рядів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$ як впорядкованих у часі послідовностей їх активностей. Приведені в дисертації експериментальні дані свідчать про можливість застосування розробленої методики для задач ядерного датування, що покращує достовірність встановлення часу події. Це свідчить про безсумнівну актуальність проведених дисертантом досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації. Обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій, приведених дисертанткою слідує із

використання відомих та апробованих методів Бейтмена, способів лінеаризації для побудови стандартних множин, дослідження їх повноти для нуклідів природних рядів розпаду ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$. Дослідження мають комплексний характер: Поп О.М. обґрунтовує використання арифметики довільної точності для проведення моделювання розпадних характеристик ізотопів урану та торію, досліджує їх трансформацію при відхиленні від стандартних умов часової еволюції активностей продуктів розпаду. Для уточнення значень ядерно-фізичних констант, що використовуються при розрахунках обґрунтовано використання комп'ютерного коду Decay Calculations. Інший етап досліджень полягає в обґрунтуванні використання методу Монте-Карло для переходу від точкових до ймовірнісних оцінок часу подій при ядерному датуванні. Важливим також є обґрунтування необхідності спеціальних режимів при низькофонових гамма-спектрометричних дослідженнях шляхом використання різних геометрій експериментів. Дисертантом отримано значний масив даних досліджень, отриманих нею на протязі 2010-2018 рр. Обґрунтовано також співставлення експериментальних спектрів та стандартних множин нуклідів для задач ядерного датування, встановлення замкнутості системи нуклідів та достовірності знаходження часу подій. Створено комп'ютерний код Nuclear Dating, який використовується у задачах ядерного датування.

Достовірність та новизна. Достовірність результатів роботи О.М. Поп забезпечена поєднанням теоретичних методів моделювання часових характеристик стандартних множин нуклідів, комп'ютерної інженерії при створенні програм Decay Calculations та Nuclear Dating, використання статистичних підходів як методу Монте-Карло для імітації похибок при низькофонових експериментах, а також ряду експериментальних. В останньому разі це – методи низькофонові гамма-спектрометрії з комплексом заходів для забезпечення стабільності фонових умов при довготривалих вимірах, методів ідентифікації характеристичних піків досліджуваних нуклідів для встановлення їх активностей.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що проведені О.М. Поп дослідження дають нові можливості для задач ядерного датування, геології та геохімії доквілля. Приведені в дисертації патенти та елементи бази даних часів поділ для зразків природного та штучного походження вказують на значний прикладний потенціал даної роботи.

Підсумовуючи сказане, можна виділити наступні елементи наукової новизни результатів роботи О.М. Поп:

Запропоновано оригінальну методику лінеаризації для отримання розв'язків диференціальних рівнянь Бейтмена, що враховують розгалуження (бренчіни) та досліджено їх повноту. З'ясована можливість уточнення ядерно-фізичних констант, що використовуються при таких розрахунках в рамках комп'ютерного коду Decay Calculations;

Розроблено методику композиції/декомпозиції для оцінки стану відкритості/закритості системи нуклідів досліджуваних зразків, характеру порушення умови їх стандартності. Методика апробована на прикладі нуклідних спектрів активностей природних рядів урану-торію;

Запропоновано оригінальні методики (геометрії) стабілізації та пониження фону в умовах довготривалого радіаційного експерименту. Це дало можливість реалізації радіаційного стенду для низькофонових вимірювань та встановлення інструментальних коефіцієнтів ефективності захисту напівпровідникового детектору для задач ядерного датування;

Обґрунтовано та реалізовано використання методу статистичних випробувань в задачі ядерного датування. Вказано на можливість підсилення (інтерференції) вкладів всіх нуклідів природних рядів урану-торію для покращення точності та достовірності ядерного датування із використанням методу стандартних множин.

Результати досліджень дозволили створити базу даних тривалостей часу подій об'єктів довкілля (скальних порід, ґрунтів) та артефактів Закарпаття для заданої точності та достовірності ядерного експерименту.

Представлена дисертація має завершений характер, вона складається з 4 розділів. У *першому розділі* дисертації представлено огляд сучасного стану досліджень перетворень нуклідів природних рядів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$, внаслідок радіоактивного розпаду. Аналізується сучасний стан баз ядерно-фізичних констант, що формують часові залежності активностей продуктів розпаду цих рядів. Представлено літературний огляд сучасного стану методів ядерного датування. Показана обмеженість традиційних методик ядерного датування внаслідок порушення умови закритості нуклідів природних рядів у зразках та глобальних факторів, що «перезапускають» ядерні хронометри. Обговорюється умовність використання терміну «вік подій», оскільки, природні глобальні фактори можуть суттєво впливати на радіохімію та співвідношення кількості наземних радіонуклідів певної території. *Другий розділ* дисертації присвячений моделюванню та дослідженню стандартних множини нуклідів, їх повноти для природних рядів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$ із врахуванням розгалужень (бренчингів) внаслідок ланцюжків альфа- та бета- розпадів. Запропоновано методику лінеаризації розв'язків диференціальних рівнянь Бейтмена, встановлено характер часової еволюції активностей їх продуктів розпаду. Складність вказаних розрахунків обумовлена необхідністю врахування всіх схем радіоактивного перетворення дочірніх радіонуклідів, що мають періоди напіврозпаду від часток секунд до 10^9 років. Для уточнення значень ядерно-фізичних констант, що використовуються при розрахунках, створено комп'ютерний код Decay Calculations. У *третьому розділі* приводяться характеристики радіаційного стенду для знаходження експериментальних нуклідних спектрів досліджуваних зразків: параметри напівпровідникового детектора, ефективність захисту, стабільність

низькофонових умов при тривалих вимірах, коефіцієнти для врахування геометричних розмірів та щільність зразків. Дані про низькофонові умови вимірювання систематизовано у вигляді 21 геометрії, що характеризують вологість, неконтрольовану конвекцію повітря між захистом із детектором та іншими приміщеннями, конденсацію атмосферної вологи у зовнішньому захисті, тощо. Обговорюються гамма-спектрометричні характеристики, що дозволяють ідентифікувати як дочірні, так і материнські ядра досліджуваних радіоактивних рядів з врахуванням енергії їх гамма-квантів, інтенсивності випромінювання. У *четвертому розділі* представлено результати створення бази даних апаратурних гамма-спектрів у зразках природного та штучного походження, бази даних ядерного датування скальних порід, ґрунтів та артефактів Закарпаття. Обговорюються експериментальні похибки та мінімально детектовані активності. Дисертант вказує також на важливість переходу від точкової, чи інтервальної оцінки часу подій, до ймовірнісної, що дозволяє отримати не лише його значення, але і похибку визначення для наперед заданої достовірності. Такий перехід здійснено, застосовуючи процедуру статистичних випробувань (метод Монте-Карло), що імітує похибки експерименту. У цьому розділі роботи представлено тестові результати використання методу СМН, що враховує процедуру Монте-Карло з імітаційним моделюванням похибок експерименту у межах 5-15%, для ядерного датування. Створено комп'ютерний код Nuclear Dating, який використовується у задачах ядерного датування.

Оформлення дисертації відповідає вимогам ДАК України, робота написана доступною мовою, з належним теоретичним обґрунтуванням і містить багатий ілюстративний матеріал. Автореферат синтезує основні положення дисертації і відображає її зміст.

При ознайомленні із дисертаційною роботою О.М. Поп не виникало принципових зауважень, які б стосувалися її основних положень та висновків. Є зауваження, пов'язані із подачею результатів, неясністю деяких формулювань:

Чому дисертантка не використовує числові методики розв'язання диференційних рівнянь Бейтмена, а користується вже готовими алгоритмами? Безпосередні методики розв'язання диференційних рівнянь дозволяють отримати більш повну інформацію про часову еволюцію та врахувати втрати нуклідів із системи в процесі часової еволюції.

При використанні статистичних випробувань дисертантка вибрала однакові ступені розмиття експериментальних активностей нуклідів природного ряду урану, але ж точність ідентифікації цих нуклідів різна. Чи є можливість врахування ступеня індивідуального розмиття конкретного нукліду, та як це вплине на точність ядерного датування?

У висновках вказано про створення бази даних ядерних датувань для зразків природного та штучного походження. На скільки ця база даних

відтворює часовий профіль скальних порід Карпат, враховуючи, що існують скальні породи із віком у мільярди років?

Робота має занадто великий обсяг, на мій погляд, занадто детально описані методи вимірювання γ -спектрів.

Маються і зауваження редакційного характеру. Зокрема, у вступі стверджується, що ядра природних рядів формують склад земної кори – це невірно, вони формують склад наземної радіоактивності. Друкарська помилка – «вік утворення Землі $4,5 \cdot 10^6$ років». Що значить час від часу в зразках з'являються рентгенівські лінії»?

Не дуже хороша крива ефективності.

Не розшифровано, що вказується в таблицях 4.6 – 4.9.

Зроблені зауваження не впливають на хороше враження від дисертаційної роботи О.М. Поп, та не ставлять під сумнів наукові та практичні результати, значення її роботи.

Дисертанткою опубліковано 53 наукових праць по темі роботи – 7 – у фахових наукових виданнях України, 3 – в зарубіжних наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Google Scholar, а також матеріалах конференцій на всеукраїнських і міжнародних конференціях.

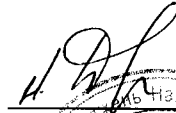
Вибір теми дослідження, актуальність роботи, проведений об'єм досліджень, їх комплексний характер та обґрунтованість отриманих результатів свідчать про високу фахову підготовку дисертанта. Вважаю, що дисертаційна робота на тему «Стандартні множини нуклідів природних рядів Th, U для задач ядерного датування: метод статистичних випробувань», повністю відповідає всім нормативним вимогам вимогам ДАК МОН України, а її автор, Поп Оксана Михайлівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук по спеціальності 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

доктор фізико-математичних наук
провідний науковий співробітник
Інституту ядерних досліджень
НАН України

 Желтоножський В.О.

Підпис Желтоножського В.О. засвідчую:

вчений секретар ІЯД НАН України
кандидат фізико-математичних наук

 Дорошко Н.Л.
