



МАСЛЮК

Володимир Трохимович – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України

ПРО СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ І ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ПРИСКОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОНІВ (МІКРОТРОНІ) М-30

**За матеріалами наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 12 жовтня 2016 року**

У доповіді розглянуто історію створення академічного ядерного підрозділу на Закарпатті, основні характеристики мікротрона М-30 (1–30 MeV) та вагомі результати, досягнуті ужгородськими науковцями за останні роки. Окреслено перспективи розвитку досліджень на мікротроні М-30 з фізики атомного ядра та радіаційної фізики твердого тіла. Унікальні параметри М-30 за моноенергетичністю пучка електронів, можливості реалізації на його базі потужних нейтронних чи γ -полів випромінювання є привабливими для застосувань у різних сферах – від ядерної енергетики і космічного приладобудування до ядерної медицини та радіоекології.

Історія створення академічного ядерного підрозділу на Закарпатті

Як відомо, ядерно-фізичні дослідження не належать до числа публічних і доступних для широкого кола науковців. Робота з джерелами іонізуючого випромінювання потребує підготовленого персоналу, спеціальних регламентів, приміщень та високоартісного обладнання.

Історія створення академічного ядерного підрозділу на Закарпатті є доволі повчальною. У 50–60-х роках минулого століття, після перших повоєнних випусків висококваліфікованих інженерів, постала необхідність розвитку та інтенсифікації промисловості в Західній Україні. Вирішення цього завдання потребувало наукової підтримки, яку могли надати лише наукові установи Академії наук України. Протягом січня-лютого 1969 р. було прийнято кілька Постанов ЦК КПУ, а потім і АН УРСР, у тому числі «Про подальший розвиток наукових закладів АН УРСР в західних областях УРСР» та «Про

створення підрозділів АН УРСР в м. Львів, Чернівці, Ужгород та Івано-Франківськ» (від 24.01.1969).

Цим політичним рішенням передували, зокрема, такі події. Наприкінці 1950-х років, в один зі своїх візитів на Закарпаття, академік АН СРСР Петро Леонідович Капиця, майбутній лауреат Нобелівської премії, зустрівся з першим секретарем Закарпатського обкому партії Ю.В. Ільницьким і висловив пропозицію щодо створення в регіоні фізичного підрозділу Академії. Мотивацією було надзвичайно вдале географічне положення, наявність матеріально-технічної бази і високий рівень досліджень в Ужгородському державному університеті. Партійне керівництво підтримало цю ініціативу. Слід відзначити й активну участь у цих подіях академіка АН СРСР Георгія Миколайовича Фльорова, який звернувся листом до тодішнього першого секретаря ЦК КПУ П.Ю. Шелеста і домігся з його боку повної підтримки.

Створенню академічного ядерного підрозділу на Закарпатті активно сприяли також академіки АН УРСР Борис Євгенович Патон, Олег Федорович Немець, Митрофан Васильович Пасічник, Іван Миколайович Вишневський, а також представники адміністрації інститутів фізики, ядерних досліджень та ядерно-фізичних академічних підрозділів Харкова.

Відділ теорії елементарних взаємодій (до 1979 р. — теорії адронів) Інституту теоретичної фізики АН УРСР та відділ фотоядерних процесів Інституту ядерних досліджень АН УРСР (ІЯД) стали тим фундаментом, на основі якого зусиллями справжнього ентузіаста, засновника ужгородської наукової школи в галузі атомної фізики та фізичної електроніки професора Івана Прохоровича Запісочного в 1979 р. було створено Ужгородське відділення ІЯД. З вересня 1992 р. на його базі організовано першу на Закарпатті самостійну академічну установу — Інститут електронної фізики НАН України. Сьогодні під керівництвом академіка НАН України Отто Бартоломійовича Шпеника Інститут посідає гідне місце серед академічних установ України і є визнаним лідером у га-

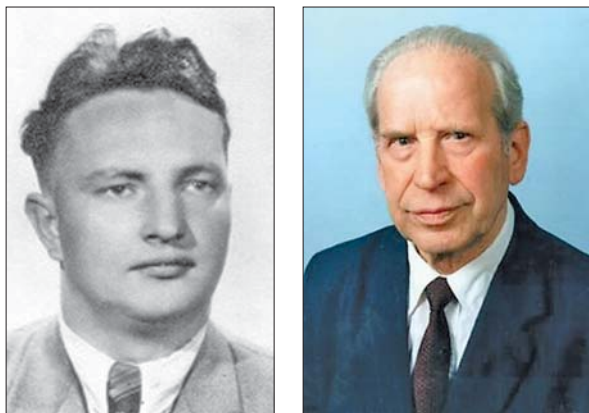


Рис. 1. Професори В.О. Шкода-Ульянов та І.П. Запісочний, які стояли біля витоків розвитку ядерно-фізичних досліджень на Закарпатті

лузі фізики поділу, ізометрії атомного ядра та практичних застосувань ядерних технологій.

Створення першого академічного підрозділу на Закарпатті було результатом втілення плану з організації центрів академічної науки в західних областях України. У вирішенні цього завдання брали участь багато визначних особистостей, зокрема перший керівник відділу фотоядерних процесів ІЯД професор Володимир Олександрович Шкода-Ульянов, який до того працював у рамках ядерного проекту під керівництвом І.В. Курчатова. Він багато зробив для забезпечення і підтримання високого рівня досліджень у регіоні, налагодження наукових контактів з колегами із сусідніх держав Центральної та Східної Європи.

На сьогодні мікротрон М-30 є єдиною і унікальною в Україні ядерно-фізичною установкою в діапазоні енергій прискорених електронів 1–30 МеВ, що має необхідне обладнання, напрацьовані методики та кваліфікований персонал з досвідом роботи в галузі радіаційної сертифікації приладів і матеріалів космічного та спеціального призначення. Згідно з розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2002 № 472-р, мікротрон М-30 внесено до переліку об'єктів, що становлять національне надбання України.

Слід зауважити, що створення на базі Інституту електронної фізики НАН України ре-

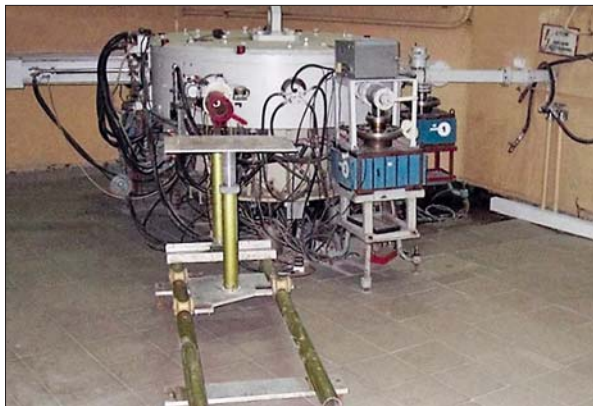


Рис. 2. Мікротрон М-30 та метрологічний стенд для фундаментальних і прикладних досліджень

гіонального ядерно-фізичного комплексу за участю наукових підрозділів Угорщини, Словаччини, Румунії та Польщі залишається актуальним і сьогодні.

Електронний прискорювач мікротрон М-30 для наукових досліджень

Базовою ядерно-фізичною установкою відділу фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України є прискорювач електронів мікротрон М-30. Цю установку свого часу було передано в Ужгород з Об'єднаного інституту ядерних досліджень (ОІЯД) у м. Дубна, змонтовано і налагоджено руками молодих талановитих науковців та інженерів під керівництвом професора В.О. Шкоди-Ульянова. Велику підтримку цьому проекту надавав академік П.Л. Капиця, який організував передання робочих креслень, постачання комплектуючих, забезпечив умови для стажування персоналу.

Мікротрон М-30 — циклічний прискорювач релятивістських електронів зі змінною кратністю прискорення. Електрони в ньому прискорюються змінним електричним полем постійної частоти і рухаються в постійному в часі однорідному магнітному полі [1]. Ідею створення мікротронів запропонував ще в 1944 р. В.І. Векслер. У М-30 прискорювальним модулем є об'ємний резонатор, що збуджується імпульсним магнетроном. Силова установка

мікротрона використовує як генератор НВЧ магнетрон МІ-262 з потужністю в імпульсі 9 МВт, частотою генерації 3200 МГц, тривалістю імпульсу опромінення 0,2–0,3 мкс, прогальністю (скважністю) — 3300–5000. Імпульс випромінення мікротрона являє собою послідовність згустків електронів, які слідують один за одним з частотою 3200 МГц і тривалістю ~30 пс.

Енергія прискорених електронів. У мікротроні М-30 за кожне проходження пучка електронів через резонатор енергія електронів зростає на 0,51 МеВ і вони починають рухатися вже по наступній, вищій орбіті в магнітному полі. Число орбіт у вакуумній камері М-30 становить 29, зміна енергії відбувається плавно в межах 1–3 МеВ з пульса управління мікротроном і ступінчато в межах від 1,4 до 24 МеВ. Ступенева зміна енергії потребує 5–6 годин. Основними параметрами, що визначають енергію прискорених електронів у М-30, є номер орбіти і величина магнітного поля вакуумної камери.

Регулювання енергії прискорених електронів може відбуватися такими способами:

- *покроково*, в межах 3–30 МеВ: з кроком 1,5 МеВ у першому та 3 МеВ у другому режимах прискорення внаслідок використання відповідних хвилевідних вставок, розміщених у вакуумній камері;
- *плавно*, в заданих межах значень енергії між хвилевідними вставками внаслідок зміни величини прискорювального потенціалу в резонаторі та подальшої зміни напруженості ведучого магнітного поля.

Струм прискорених електронів. Середній струм пучка електронів у М-30 може змінюватися в межах від 0,01 мкА до максимального значення 50 мкА ($3,12 \cdot 10^{14}$ ел.с⁻¹) і залежить від енергії: більше значення струму досягається за менших енергій. Пучок електронів з прискорювача виводиться через вікно з титану завтовшки 25 мкм ($11,3$ мг·см⁻²); при проходженні крізь титанове вікно електрони втрачають до 30 кеВ від початкової енергії. Часова нестабільність густини потоку електронів $\leq 14\%$. Пучок електронів при виході з прискорювача

М-30 має форму еліпса з осями розміром 10–12 мм по горизонталі і 3–4 мм по вертикалі, розбіжність виведеного пучка електронів до вивідного вікна: у вертикальному напрямку – $1,5 \cdot 10^{-3}$ радіан, в горизонтальному – $1,5 \cdot 10^{-2}$ радіан. Ефективність виводу електронів з мікротрона М-30 досягає 80–100%. Основними параметрами, що визначають величину струму прискорених електронів у М-30, є температура катода, значення прискорювальної напруги з катода, ефективності захоплення НВЧ-поля модулятора, ефективності виводу електронів тощо. Струм прискорених електронів в імпульсі змінюється в межах 20–50 мА, тривалість імпульсу струму пучка 0,15–0,20 мкс, частота повторення імпульсів 2000 с^{-1} .

Зазначений діапазон енергій прискорених електронів у мікротроні М-30 (1–30 МеВ) відкриває перспективи для численних застосувань у фундаментальних дослідженнях реакцій збудження та поділу атомних ядер (фізика нейтронів, фотоядерні реакції, збудження ізомерних станів) та проведення прикладних ядерно-фізичних робіт, зокрема з радіаційної фізики твердого тіла, ядерної медицини та екології.

Висока моноенергетичність пучка електронів і можливість їх конвертації в радіаційні поля нейтронного чи γ -випромінювання дозволяють створити на базі М-30 радіаційний стенд для дослідження радіаційної стійкості матеріалів і приладів в умовах дії потужних пучків нейтронів, γ -випромінювання та швидких електронів.

Фундаментальні дослідження на М-30

Фотоядерні реакції збудження та поділу атомних ядер, які досліджують на мікротроні М-30, пов'язані з використанням гальмівного випромінювання, що утворюється при взаємодії релятивістських електронів, наприклад, з вольфрамівною фольгою. Так, взаємодія γ -кванта з ядром може приводити до фотонейтронних, типу (γ, n) , реакцій, коли збуджений стан ядра знімається випромінюванням нейтрона або ж γ -кванта іншої енергії – реакції типу (γ, γ') .

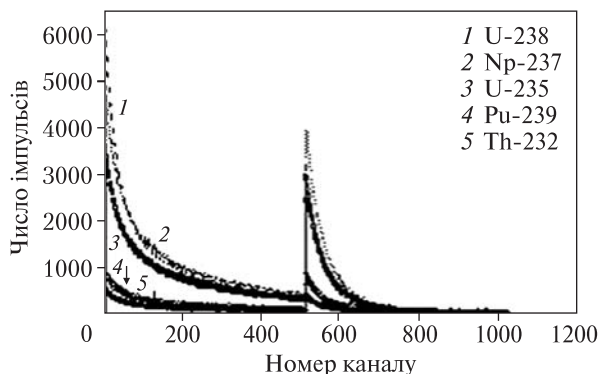


Рис. 3. Часовий розподіл запізнілих нейтронів при фотоподілі актинідних ядер гальмівним випромінюванням з $E_{\gamma \text{max}} = 15 \text{ МеВ}$. Ширина каналів: від 1-го до 512-го – 0,1 с, для 513-го каналу – 0,8 с, від 514-го до 1024-го – 1 с

У разі, якщо енергія (частота) γ -кванта потрапляє в резонанс з власною частотою атомного ядра, може відбутися поділ ядра, так званий гігантський дипольний резонанс, або реакція типу (γ, f) .

Нейтронна фізика. Роботи з цього напрямку стосуються вивчення поділу атомних ядер під дією налітаючих нейтронів, реакції типу (n, f) , а також досліджень особливостей емісії нейтронів при поділі важких ядер, тонкої структури функцій нейтронної активності та множинності нейтронів, поділу базових ізотопів ядерних реакторів нового покоління на підкритичних збірках, таких як $^{235,238}\text{U}$, ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , мінорних актинідів та ізотопів Am, Cm, Np, Cf, Pa для різних схем їх поділу, таких як (γ, f) , (n, f) . Такі дані потрібні, зокрема, для збільшення щільності зовнішніх (драйверних) нейтронних потоків, що використовуються для реакторів на підкритичних збірках.

Інший цікавий напрям пов'язаний з фізикою запізнілих нейтронів, що супроводжують поділ важких ядер. Так, на мікротроні М-30 було досліджено часові та енергетичні спектри запізнілих нейтронів при фотоподілі ядер актинідів, зокрема ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$, ^{237}Np , ^{241}Am , в інтервалі максимальних енергій гальмівного випромінювання 9–18 МеВ. На рис. 3 наведено результати унікального експерименту з дослідження часового спаду нейтронної ак-

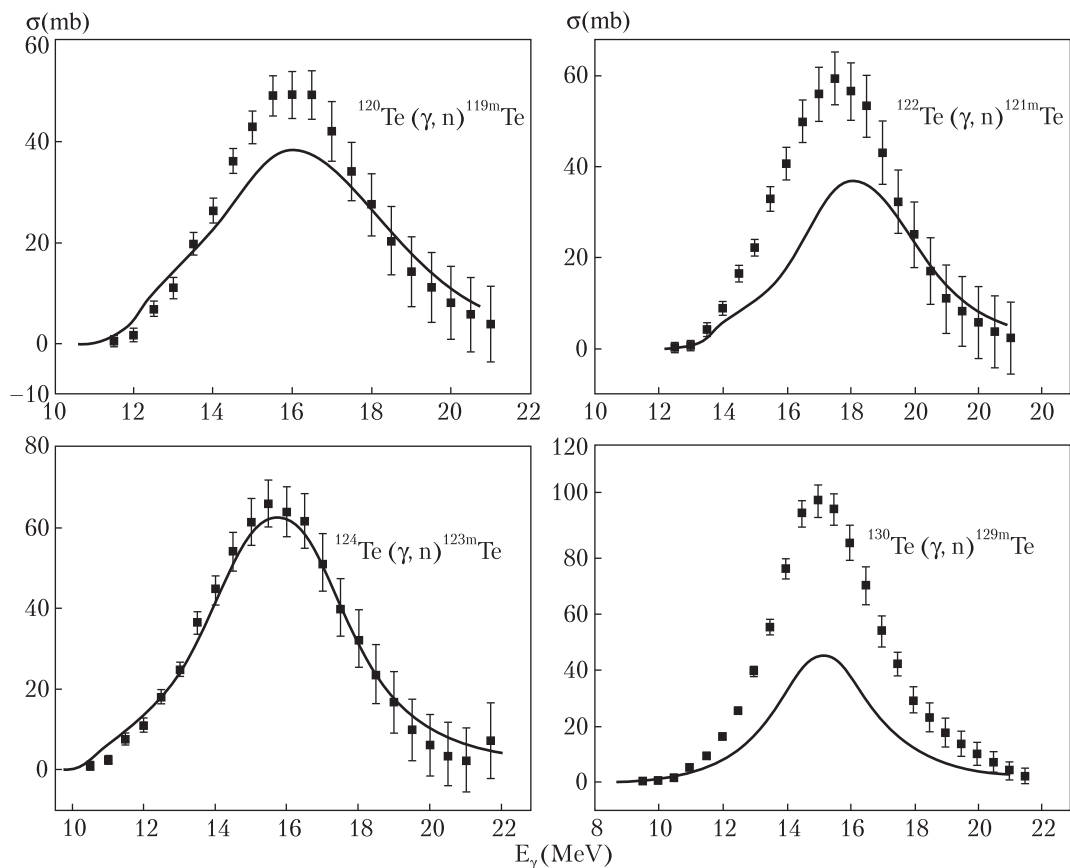


Рис. 4. Переріз збудження ізомерних станів у реакціях (γ, n) для ізотопів телуру

тивності ізотопів ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$, ^{237}Np , ^{239}Pu в реакціях їх фотоподілу на М-30. Такі часові залежності дозволяють встановити для вказаних ядерних матеріалів повні та приведені перерізи утворення запізнених нейтронів, тонку структуру виходів нейтронів, а також розрахувати їх кінетичні функції. Ці дані є важливими для ядерної енергетики та активаційного аналізу подільних матеріалів.

Фізика ізомерів ядра. В експериментах на мікротроні М-30 досліджено залежність збудження ізомерних станів від енергії γ -квантів у реакціях непружного розсіювання γ -квантів у діапазоні 4–15 MeV і у фотонейтронних реакціях у діапазоні 8–18 MeV [2–4]. Уперше було виміряно перерізи реакцій $(\gamma, \gamma)^m$ більш як 20 ізотопів, серед яких ^{77}Se , ^{79}Br , ^{87}Sr , $^{111,116}\text{Cd}$, $^{113,115}\text{In}$, ^{137}Ba , ^{167}Er , $^{179,180}\text{Hf}$, ^{183}W , ^{191}Ir , ^{199}Hg ,

^{195}Pt , ^{197}Au . Приклади встановлення таких перерізів фотоядерної реакції для ізотопів телуру наведено на рис. 4.

Було також запропоновано методи систематизації ймовірностей заселення ізомерних станів від маси ядер, різниці спінів основного та ізомерного станів, енергії γ -квантів і одержано аналітичні залежності. Уперше для реакції $(\gamma, n)^m$ отримано перерізи збудження ізомерних станів атомних ядер ^{45}Sc , $^{77,78,80,82}\text{Se}$, ^{81}Br , $^{85,87}\text{Rb}$, $^{86,88}\text{Sr}$, ^{90}Zr , ^{92}Mo , ^{110}Pd , $^{111,115}\text{Cd}$, ^{113}In , $^{120,122,124,128,130}\text{Te}$, $^{134,136,138}\text{Ba}$, ^{142}Nd , ^{144}Sm , ^{153}Eu , ^{168}Er , ^{180}Hf , ^{184}W , ^{185}Re , ^{198}Pt , ^{198}Hg , а також експериментальні значення ізомерних відношень виходів і перерізів на цих ядрах. Одержано також дані про структуру перерізів збудження ізомерних станів в області порогів вильоту нейтронів для ядер замкнутої нейтронної обо-

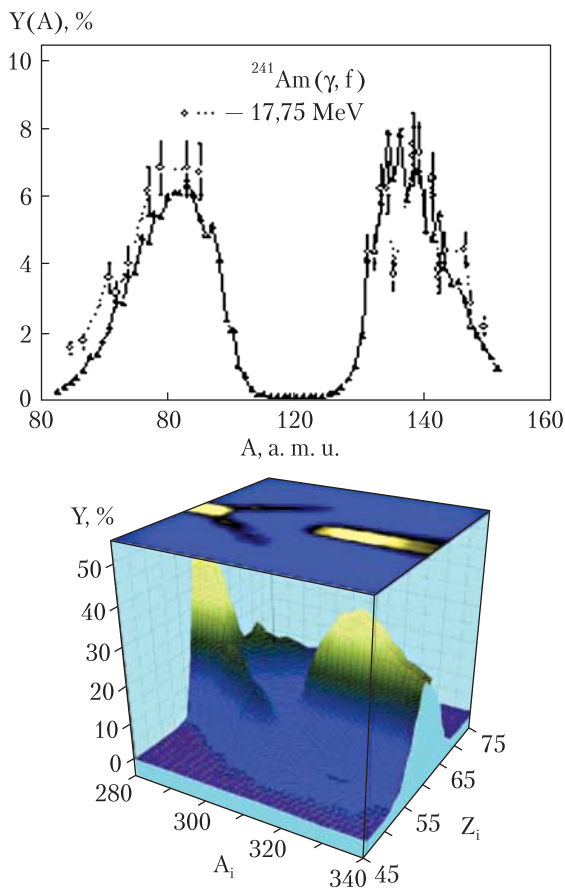


Рис. 5. Експериментальний масовий спектр уламків фотоподілу ядра ^{241}Am (а) і теоретичний спектр уламків поділу для ядра з $Z = 118$ (б)

лонки $N = 50$ і виявлено оболонкові ефекти при заповненні оболонки в районі ізоотопів ^{88}Sr і ^{142}Nd . Ці дані є важливими для завдань нуклеосинтезу, створення потужних γ -лазерів.

Фізика поділу атомних ядер. На М-30 методом напівпровідникової γ -спектрометрії проведено систематичні дослідження виходів уламків фотоподілу актинідних ядер для області енергій 10–18 МеВ. Так, уперше проведено систематичні вимірювання кумулятивних виходів уламків фотоподілу: $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , $^{91\text{m}}\text{Y}$, ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{97}Zr , ^{97}Nb , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{129}Sb , ^{131}Te , ^{131}I , ^{132}Te , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{138}Cs , ^{139}Ba , ^{140}La , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{142}La , ^{143}Ce , ^{147}Nd , ^{149}Nd ядер ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{232}Th , ^{238}U для області енергій гігантського дипольно-

го резонансу. Для зазначених ядер проведено розрахунки повних виходів продуктів поділу і підсумовано за всім масовим ланцюжком. Дані таких експериментів важливі для розуміння природи стійкості ядерної матерії, ролі квантових ефектів та ядерних сил при поділі атомних ядер. Для інтерпретації отриманих експериментальних результатів запропоновано кольорову статистику, яка є універсальною щодо типу досліджуваних атомних ядер [5, 6]. На рис. 5 показано, як результати експериментальних вимірювань уламків поділу для ізоотопу америцію, так і дані розрахунків для нещодавно синтезованого надважкого ядра з $Z = 118$ [6].

Такі дані важливі для досліджень у галузі нуклеосинтезу, ядерної енергетики, ядерної медицини, радіоекології та для поповнення світової бази ядерно-фізичних констант. Експериментальні дані, отримані на мікротроні М-30, увійшли до циклу робіт «Закономірності і аномальні явища в ядерних процесах», відзначеного Державною премією України в галузі науки і техніки за 1999 р. (проф. В.М. Мазур).

Отже, результати, отримані на М-30, засвідчують пріоритет вітчизняної науки в галузі експериментальної ядерної фізики.

Прикладні дослідження на мікротроні М-30

Як було зазначено вище, радіація спричинює збудження й перетворення атомних ядер та утворення з них нових хімічних елементів, тоді як унаслідок взаємодії високоенергетичного випромінювання з речовиною відбуваються структурні перетворення, утворюються збуджені атомарні стани, уможливаються екзотичні хімічні реакції. Радіація, діючи на біологічні об'єкти, впливає на фізіологічні показники, процеси метаболізму, спричинює генетичні зміни тощо. Причому інтенсивність таких взаємодій залежить від сорту випромінюваних частинок — електрони, γ -кванти чи нейтрони.

Можливість дослідження цих властивостей на М-30 становить інтерес з погляду приклад-

них застосувань. Висока моноенергетичність випромінювання, можливість реалізувати змішані радіаційні поля, прецизійна дозиметрія кожної з компонент є дуже важливими для розроблення нових радіаційних технологій.

Метрологічний стенд на базі М-30 для радіаційних випробувань матеріалів та приладів спеціального призначення. Відомо, що радіація призводить до зміни робочих параметрів матеріалів та приладів. Встановлення їх реальної стійкості до дії радіаційних факторів є важливим завданням спеціального приладобудування, що визначає умови експлуатації апаратури для ядерної енергетики, космічної техніки чи виживання спеціальної апаратури в умовах дії факторів ядерного вибуху чи високого рівня радіації.

Світова практика таких випробувань полягає у створенні на базі ядерно-фізичних установок метрологічних радіаційних стендів, які імітують натурні умови використання досліджуваної апаратури [7]. Передусім проводять обґрунтований вибір виду іонізуючого випромінювання та його інтенсивності, які визначають умови проведення радіаційних випробувань. Задаючи режим опромінення досліджуваного об'єкта, беруть до уваги радіаційні ефекти, які залежать від потужності дози та інтегральної поглиненої дози, а також домінуючі радіаційно-фізичні та радіаційно-хімічні процеси, що зумовлюють погіршення основних експлуатаційних параметрів об'єкта. У складних системах прагнуть виявити найслабкішу ланку, яка переважно й визначає їх радіаційну стійкість.

При метрологічній атестації М-30 встановлюють просторово-часові та енергетичні характеристики електронного пучка мікротрона (такі як його енергія, щільність та розподіл щільності потоку електронів на полі опромінення); експлуатаційні характеристики М-30, які впливають на зазначені вище характеристики, для визначення допустимих відхилень експлуатаційних параметрів, що забезпечують при опроміненні зразків підтримання енергії електронів, щільності потоку електронів та інтегрального потоку із заданою похибкою. Важ-

ливою характеристикою М-30, яка визначає характерні розміри апаратури, що атестується, є однорідність радіаційного поля в площині розміщення зразків. Для формування рівномірної щільності потоку електронів використовують систему розсіювачів і формувачів поля опромінювання, а контроль *in situ* виконують за допомогою спеціального сканера радіаційного поля.

На рис. 6 показано робочі етапи радіаційних випробувань на М-30 та досліджувані зразки космічної техніки.

Іншим важливим завданням для М-30 є реалізація змішаних радіаційних полів, контроль їх компонент та дозиметрія випромінювання. Крім радіаційних випробувань метрологічно повірені поля є важливими для розроблення персональних дозиметрів високоенергетичних γ -, електронних та нейтронних пучків для персоналу АЕС, дослідницьких чи медичних прискорювачів [8, 9].

М-30 для встановлення мікроелементного складу речовини. Методи нейтронної і γ -активації було вперше застосовано з використанням мікротрона М-30 для контролю за хімічною чистотою вихідних матеріалів, стехіометрії складних напівпровідників та ідентифікації їх мікроелементного й ізотопного складу. Активаційні методики ґрунтуються на реєстрації вторинного випромінювання при розпаді або релаксації станів атомних ядер, збуджених гальмівним чи нейтронним випромінюванням. Вони є універсальними щодо маси та форми зразків, а їх чутливість може досягати 10^{-4} – 10^{-6} г/г! Проведена серія експериментів на М-30 показала їх перспективність для визначення вмісту благородних і поліметалів у золотоносних породах Закарпаття, контролю за станом ґрунту, намулів, скельних зразків, якістю банківських металів тощо.

Здобутки в напрямі медико-екологічних досліджень. Наявність широкого спектра ядерного випромінювання та можливість прецизійної дозиметрії дозволяють розробляти на М-30 нові діагностичні й терапевтичні лікувальні методики, основані на радіаційних технологіях.

Імунологічна резистентність крові людини до радіації in vitro. Імунологічна система забезпечує сталість внутрішнього середовища організму людини і протидію патологічним процесам. Проведений на М-30 цикл досліджень стосувався показників гуморальної ланки імунітету людини, таких як титр комплементу (ТК) та циркулюючі імунні комплекси (ЦІК). Вибір цих показників зумовлений тим, що ЦІК є одним із маркерів специфічного імунного запалення, а ТК відображує неспецифічну імунологічну реактивність. Результати понад 500 досліджень, проведених спільно з науковцями-імунологами, показали можливість діагностики захворювань людини за реакцією *in vitro* її імунної системи на радіацію, а також можливість радіаційної стимуляції захисних функцій організму без безпосереднього опромінення людини. Останнє може бути використано при лікуванні СНІД-захворювань.

Визначення мікроелементного складу біооб'єктів. Плацента відіграє важливу транспортну і бар'єрну роль на шляху від організму матері до плода, що впливає на повноцінність його розвитку. На мікротроні М-30 запропоновано методику неструктивного фото ядерного аналізу та одночасного визначення вмісту основних утворюючих (Na, Ca) та есенціальних (Cl, Br, Sr, Mn, Zn, Sb, I) елементів у зразках золи плаценти. Сумарна статистична похибка отриманих значень не перевищувала 10%. Перевага цієї методики полягає у простоті проведення експерименту, можливості одночасного визначення значної кількості елементів, її чутливості та добрій відтворюваності результатів. Фотоактиваційні методики на М-30 було також використано для встановлення ізотопного складу крові людини, зокрема для контролю ізотопів ^{54}Fe , ^{137}Cs . Низькофонові експерименти дозволили провести серію досліджень вмісту в крові учасників ліквідації аварії на ЧАЕС як ^{137}Cs , так і уламків поділу важких ядер, таких як ^{22}Na , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ і ряд інших.

У галузі *ядерної медицини* на мікротроні виконано серію робіт зі встановлення режимів напрацювання коротко- (від ^{126}I до $^{99\text{m}}\text{Tc}$) та ультракороткоіснуючих (^{11}C , ^{13}N , ^{16}O , ^{18}F)



а



б

Рис. 6. Радіаційні випробування космічної техніки: *а* — етап випробування на М-30 компактного приладу SIDRA, розробленого в рамках міжнародного проекту УНТЦ за участю іспанських фахівців; *б* — після радіаційних випробувань першого українського наносупутника у форматі кубсат PolyITAN-1, створеного в НТУУ КПІ, зліва направо: керівник розробки PolyITAN-1 Б. Расамакін і науковий керівник супутникового експерименту з українським приладом СТЕП-Ф на борту штучного супутника Землі КОРОНАС-ФОТОН та керівник розробки SIDRA О. Дудник. Ужгород. 2014 р.

радіонуклідів для радіоізотопної діагностики/терапії, у тому числі комп'ютерної ПЕТ-томографії.

За даними *радіоекологічного моніторингу* замулів гірських річок і ґрунтів заповідних територій встановлено закономірності просто-

рового та сезонного розподілу радіонуклідів природного і техногенного походження для гірських та низинних районів Закарпаття [10, 11]. Отримані результати дали змогу пояснити механізм самоочищення гір від важких металів, що переносяться вітровими потоками, встановити стандарти вмісту радіонуклідів у ґрунтах, намулах водойм для ізольованих районів Карпат.

Інші застосування М-30:

- отримання нових даних про технічні режими радіаційної обробки нафти для зменшення енергомосткості при транспортуванні нафтопродуктів, радіаційного крекінгу нафти для збільшення глибини переробки вуглеводнів, виділення з них важких і благородних металів;

- дослідження здатності цеолітів Закарпаття до сорбції важких металів, а також встановлення вмісту благородних і рідкісних металів у місцевих рудниках;

- вивчення особливостей радіаційного ефектоутворення в напівпровідниках, зокрема в складних напівпровідниках A_2B_6 , A_3B_5 , оптичних матеріалах і тонкоплівкових структурах, у тому числі у фотovoltaїчних структурах; розроблення радіаційних технологій для спрямованої зміни технічних параметрів напівпровідникових структур та напівпровідникових приладів; встановлення ефекту «радіаційних крапель» та особливостей радіаційної стабілізації напівпровідників при граничних дозах опромінювання; можливість радіаційно-

го фарбування коштовних та напівкоштовних кристалів;

- спеціальне застосування ядерно-фізичних методик у заходах з протидії нелегальній міграції ядерних матеріалів через західний кордон України.

Серед досягнень слід згадати також створення електронного атласу, який містить 106 апаратурних γ -спектрів для хімічних елементів і сполук, активованих гальмівним γ - та нейтронним випромінюванням М-30 [12].

Висновки

Отже, можливості мікротрона М-30 забезпечують важливий сегмент досліджень сучасної ядерної фізики з елементарних процесів збудження та фотоподілу ядра. У світовій науці результати досліджень ужгородських фізиків доповнюють бази даних відомих ядерних центрів, отримані на більш потужних ядерно-фізичних установках. Одержані на М-30 дані можуть стати основою багатьох застосувань радіаційних методик для створення нових технологій у виробництві, медицині, екології.

Беззаперечним є той факт, що ядерна фізика — це базовий високотехнологічний компонент сучасної науки і техніки. Для Закарпаття наявність досліджень у цій сфері свідчить про високий рівень розвитку регіональної науки, можливість розроблення і впровадження сучасних конкурентоспроможних технологій у регіоні.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Kapitsa S.P., Melekhin V.N. *Microtron*. (Moscow: Nauka, 1969). [Капица С.П., Мелехин В.Н. *Микротрон*. М.: Наука, 1969].
2. Mazur M. Giant dipole resonance in the cross sections for the gamma-quantum absorption by nuclei. *Ukr.J. Phys. Rev.* 2006. **3**(1): 30. [Мазур В.М. Гігантський дипольний резонанс в перерізах поглинання гамма-квантів ядрами. *УФЖ. Огляди*. 2006. Т. 3, № 1. С. 30—44].
3. Mazur V.M., Bigan Z.M., Symochko D.M. Population of metastable states in Rb isotopes in the photoneutron reactions. *Journal of Physics G*. 2010. **37**(3): 035101.
4. Mazur V.M., Symochko D.M., Bigan Z.M., Poltorzhyska T.V. Excitation of the $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$ and $^{129}\text{Te}^m$ isomers in (γ, n) reactions from 10 to 22 MeV. *Phys. Rev. C*. 2013. **87**: 044604.

5. Maslyuk V.T., Parlag O.A., Lendyel O.I., Marynets T.I., Romanyuk M.I., Shevchenko O.S., Ranyuk Ju.Ju., Dovbnia A.M. Calculation of the fission-fragment yields of the pre-actinide by the example of the natPb isotopes. *Nuclear Physics*. 2016. **955**: 79.
6. Maslyuk V.T., Smolyanyuk A.V. Super-heavy nuclei with $Z = 118$ and their mass and charge spectrum of fission fragment. *Europhysics Letters*. 2015. **112**(5): 52001.
7. Dotsenko O.V., Maslyuk V.T., Tarasov V.B., Tikhii V.G., Shovkoplyas Y.A. Improvement of space radiation shielding characteristics of carbon fiber reinforced honeycomb structures. *Space Science and Technology*. 2009. **15**(4): 58.
[Доценко О.В., Маслюк В.Т., Тарасов В.Б., Тихий В.Г., Шовкопляс Ю.А. Улучшение характеристик углепластиковых сотовых конструкций для защиты от ионизирующих излучений космического пространства. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 4. С. 58–71].
8. Maslyuk V., Megela I., Okunieva T., Pekar J., Pekar V. Specific features of the influence of high-current high-energy electron beams on the luminescent properties of undoped and Nb, Fe-doped Al_2O_3 crystals. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. **162**(1–2): 34.
9. Parlah O.O., Masliuk V.T., Dovbnia A.M., Holovei V.M., Pylypchinets I.V., Lendel O.I., Simochko D.M. Application of boron carbide B_4C for cleaning bremsstrahlung radiation beams of electron accelerators. *Patent Ukraine*. No 96384. 10.02.2015.
[Парлаг О.О., Головей В.М., Лендел О.І., Симочко Д.М., Маслюк В.Т., Пилипчинець І.В., Довбня А.М. Застосування карбиду бору B_4C для очищення пучків гальмівного випромінювання електронних прискорювачів. Патент України. № 96384. 10.02.2015].
10. Maslyuk V.T., Svatyuk N.I., Stets M.V., Frontasyeva M.V., Parlag O.O. Statistical regularities in the distribution of radionuclides in sediments of Transcarpathia mountain rivers. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. **117**: 9.
11. Maslyuk V., Symkanich O., Svatyuk N., Parlag O., Sukharev S. The natural radioactivity of the Carpathian national parks and radon evaluation. *Nukleonika*. 2016. **61**(3): 351.
12. Parlah O.O., Masliuk V.T., Puga P.P., Holovei V.M. Gamma-Spectra Catalogue for Products of Chemical Element Activation by Microtron Bremsstrahlung. (Kyiv: Naukova Dumka, 2007).
[Парлаг О.О., Маслюк В.Т., Пуга П.П., Головей В.М. *Каталог гамма-спектрів продуктів активації хімічних елементів гальмівним випромінюванням мікротрона*. К.: Наук. думка. 2007].

V.T. Maslyuk

Institute of Electron Physics of National Academy of Sciences of Ukraine (Uzhhorod)

ON THE MODERN STATE AND PROSPECTS OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH AT THE ELECTRON ACCELERATOR (MICROTRON) M-30

The report presents the history of the first nuclear academic institution in Transcarpathia, the main parameters of microtron M-30 (1–30 MeV) and the significant results obtained by Uzhhorod scientists during last years. The prospects of the new studies in the field of nuclear physics and radiation physics of solid state by using the M-30 microtron are outlined. It is shown that unique parameters of the M-30 microtron as well as the monoenergetic spectrum of the electron beam, the possibilities of realizing the intense irradiation neutron or gamma fields are very attractive for numerous applications: from nuclear power and space engineering to nuclear medicine and radioecology.