



УДК 069.444:271.2-526.2(477)«1724»  
DOI <https://doi.org/10.55389/2786-5797.2024.01.03>

**Олександр БУГАЙ,**

кандидат фізико-математичних наук, завідувач сектору,  
Інститут прикладної фізики НАН України (Суми, Україна),  
Комунальний заклад «Центр консервації предметів археології» (Київ, Україна)  
e-mail: alex.buhay@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6813-0413>

**Євген ОСАДЧИЙ,**

кандидат історичних наук, науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України (Суми, Україна)  
ORCID: hte-mail:osadchij.75@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9143-110X>

**Володимир БІЛИК,**

молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України (Суми, Україна)  
e-mail: v.m.bilyk.sumy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7022-7188>

## ЯДЕРНО-ФІЗИЧНІ МЕТОДИ В ЗАДАЧАХ ЗБЕРЕЖЕННЯ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

**АНОТАЦІЯ.** Праця покликана ознайомити широке коло дослідників у сфері культурної спадщини з можливостями ядерно-фізичних методів для дослідження й збереження культурної спадщини. Розглянуто основні напрями застосування ядерно-фізичних методів: характеристизацію, датування, збереження і реставрацію. На прикладах характеристизації турецьких керамік і пігментів для їх декоративного розпису, а також металевих артефактів, знайдених під час розкопок Церкви Спаса у Берестові, продемонстровано можливості методів індукованої частинками рентгенівської емісії (PIXE) та рентгенфлуоресцентного аналізу. Датування із застосуванням прискорювальної мас-спектрометрії показано на прикладі датування деревини човна-довбанки із Сумського обласного краєзнавчого музею.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** культурна спадщина, ядерно-фізичні методи, характеристизація, абсолютне датування, збереження, реставрація.

**Вступ.** Про важливість пам'яткоохоронної діяльності, на прикладі Європи, свідчать такі факти: 1) культурна спадщина є невідновлюваним ресурсом, що вимагає бережного поводження; 2) культурна спадщина є ключем до конкурентоздатності держави з точки зору її культурної та національної самоідентифікації, а також культурного туризму; 3) індустріальний ринок для європейських компаній, задіяних у збереженні та реставрації нерухомих пам'яток культурної спадщини та культурних цінностей, музейних предметів і предметів

музейного значення, становить 5 млрд євро і постійно зростає<sup>1</sup>. Ці факти набувають дедалі більшої актуальності у зв'язку із входженням України в Європейський Союз.

Останнім часом ядерно-фізичні методи широко використовують у сфері культурної спадщини. Їх неруйнівний характер та надійність є важливими перевагами для їх застосування до об'єктів, що мають високу цінність. Ядерно-фізичні методи можуть надати інформацію про походження артефактів, їх автентичність, сприяти їх достовірній категоризації та допомогти оцінити ступінь пошкоджень. Більше того, методи ядерної фізики можуть ефективно бути використані під час реставрації таких артефактів та їх консервації для надійного збереження. Про ефективність вищезгаданих підходів свідчать створення ядерно-фізичної лабораторії на базі прискорювачів в Музеї Лувр та створення європейського консорціуму лабораторій CHARISMA, спрямованого на дослідження у сфері культурної спадщини. Активну діяльність щодо впровадження досягнень ядерної фізики для культурної спадщини координує МАГАТЕ.

Метою цієї праці є ознайомлення кінцевих користувачів з інформацією щодо застосовності методів ядерної фізики до об'єктів культурної спадщини.

**Напрями застосування ядерно-фізичних методів.** Дослідження та практичні роботи у сфері збереження культурної спадщини виконуються за такими напрямками: 1) характеристика об'єктів; 2) абсолютне датування; 3) збереження матеріальної субстанції пам'яток культурної спадщини; 4) реставрація. Методи ядерної фізики з використанням прискорювачів, портативних рентгенівських спектрометрів, прискорювальних мас-спектрометрів, лінійних прискорювачів електронів тощо можуть бути застосовані та застосовуються для всіх вищезгаданих напрямів роботи з артефактами культурної спадщини.

**Характеризація.** Це дослідження фізико-хімічних та інших характеристик артефактів культурної спадщини, за допомогою яких здійснюється наукова атрибуція, ідентифікація та визначення походження об'єктів, їх приналежності до будівельних і культурно-мистецьких шкіл. Важливим етапом у процесі дослідження об'єктів культурної спадщини є визначення елементного складу об'єкта та його структури. Така інформація дуже важлива, оскільки дає можливість оцінити щонайменше матеріальну цінність об'єкта. Наприклад, оцінити чи з дорогоцінних металів і яких саме зроблена та чи інша річ. Знаючи елементний склад об'єкта, можна зрозуміти технологію його виготовлення. Крім того, у разі виявлення в елементному складі об'єкта характерних «слідових» елементів можна вказати місце походження матеріалів для його виробництва. Артефакти часто є унікальними і цінними, тому важливий неруйнівний характер методів. Ядерно-фізичні методи повністю задовольняють ці вимоги. Методами визначення елементного



<sup>1</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2011). Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research, IAEA Radiation Technology Series No. 2, IAEA, Vienna.



складу є нейтронно-активаційний аналіз, методи іонно-зондового аналізу, рентгенфлуоресцентний аналіз, електронно-зондовий мікроаналіз. Розглянемо методи, які вже реалізовані та застосовуються для дослідження культурної спадщини або можуть бути відносно легко реалізовані в Україні.

*Методи іонно-зондового аналізу.* До методів іонно-зондового аналізу належать методи, що базуються на генерації іонним пучком рентгенівського випромінювання PIXE (Particle Induced X-Ray Emission), гама-випромінювання PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission), спектротрометрія резерфордівського зворотного розсіювання, люмінесценція, індукована іонним пучком (IBIL — ion beam induced luminescence) тощо)<sup>2</sup>. Метод PIXE застосовують найчастіше для характеристики культурної спадщини, тому зупинимося на ньому детальніше. Це один із методів іонно-зондового аналізу, він є однією з технік для дослідження елементного складу об'єктів. Метод належить до неруйнівних методів аналізу і характеризується високою точністю та чутливістю. Незважаючи на такі переваги, метод PIXE має також недоліки. Основний недолік методу PIXE полягає в необхідності мати прискорювач заряджених частинок для його реалізації. Хоча варто зазначити, що існують і компактні прилади для проведення PIXE-аналізу. Такі прилади як джерело заряджених частинок використовують радіоактивні речовини, які випромінюють протони або альфа-частинки. Такі прилади використовуються переважно в космічній галузі, наприклад на марсоходах. Також до недоліків можна віднести обмеження, пов'язані з неможливістю аналізувати елементи, легші за натрій. Це обмеження пов'язане зі способом детектування рентгенівського випромінювання, тобто з обмеженнями детектора.

В основі методу PIXE лежить явище емісії характеристичного рентгенівського випромінювання (рис. 1). Характеристичне рентгенівське випромінювання виникає внаслідок переходу електронів в атомі з вищих орбіт на нижчі під час взаємодії прискорених протонів із атомами досліджуваного об'єкта. Цей процес стає можливим внаслідок вибивання електронів з нижчих орбіт налітаючими протонами.

Через унікальність характеристичного випромінювання для кожного атома отриманий спектр однозначно характеризує елементний склад об'єкта.

Метод PIXE можна застосовувати для об'єктів різних типів: метал, кераміка, скло, деревина, ґрунт, біологічні об'єкти тощо. Найпростішими для аналізу є метали. Вони вимагають мінімальної пробопідготовки, зокрема, очищення від забрудників і продуктів корозії, які зазвичай наявні на поверхні металів. Складнішими для аналізу, через наявність діелектричних властивостей, є кераміки та інші діелектричні об'єкти. Для проведення досліджень таких об'єктів необхідно додатково проводити заходи із забезпечення стікання заряду з поверхні зразка.

<sup>2</sup> Buhay O.M., Drozdenko A.A., Zakharets M.I., Ignatev I.G., Kramchenkov A.B., Miroshnichenko V.I., Ponomarev A.G., Storizhko V.E. Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility. *Physics Procedia*. 2015. 66. P. 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.022>



Найскладнішими для РІХЕ-аналізу є органічні речовини. Крім діелектричних властивостей вони також мають певну специфічну реакцію на опромінення протонами (органічні зв'язки можуть руйнуватись). Тому для проведення такого аналізу необхідно підбирати параметри пучка протонів з розрахунку мінімального руйнівного впливу.

*Рентгенофлуоресцентний аналіз.* Рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) є одним з різновидів рентгеноспектральних методів, а також неруйнівним методом. Під час РФА первинне рентгенівське випромінювання спрямовується на зразок. У результаті частина рентгенівського випромінювання розсіюється зразком (комптонівське і томпсонівське розсіювання), частина проходить крізь нього, а частина поглинається зразком та приводить до генерації вторинного рентгенівського випромінювання — рентгенівської флуоресценції. Вторинне рентгенівське випромінювання містить у спектрі компоненти, характерні для хімічних елементів, що входять до складу зразка. Положення та інтенсивність аналітичних ліній (якісний та кількісний аналіз) фіксує спектрометрична частина приладів для РФА. Сучасне аналітичне обладнання для РФА дає змогу визначати всі елементи періодичної системи, починаючи з вуглецю. Типові межі виявлення для більшості елементів становлять  $10^{-4} \dots 10^{-2}$  мас. %, а максимальна концентрація, що визначається, може бути 100 %. РФА характеризується високою відтворюваністю аналітичних сигналів та експресністю визначень. Як зразки можуть використовуватись тверді, рідкі або порошкові матеріали<sup>3</sup>.

*Рентгендифракційний аналіз.* Застосування рентгенодифракційного аналізу дає можливість ідентифікувати фази в одно- та багатофазних речовинах. Фазою прийнято називати однорідну частину термодинамічної системи, фізичні властивості якої однакові у всіх точках. У стані термодинамічної рівноваги можуть перебувати як одна, так і декілька фаз. У кристалах різні фази характеризуються відмінними властивостями і кристалічною структурою. Перевагами методу рентгендифракційного аналізу є його висока чутливість та експресність. Дифракційний метод також належить до неруйнівних методів аналізу. Крім якісного у практиці поширений метод кількісного аналізу, яким можна визначити об'ємний вміст фаз у багатофазному зразку. Визначення фазового складу речовини є одним із найважливіших завдань фізико-хімічного аналізу, оскільки від фазового складу істотно залежать фізичні властивості речовин. Важливою сферою застосування методу в практичній діяльності є неруйнівний контроль технологічних процесів обробки матеріалів, що є корисним для досліджень об'єктів культурної спадщини. Зазначимо, що рентгенофазовий аналіз є не надто чутливим до просторових неоднорідностей, зумовлених флуктуацією хімічного складу фази. Наявність неоднорідностей практично не впливає на положення та інтенсивність дифракційних максимумів, тому не зменшує достовірності результатів фазового аналізу<sup>4</sup>.



<sup>3</sup> Беліков К.М., Юрченко О.І. Рентгенофлуоресцентний аналіз: навч. посіб. Харків, 2012. 52 с.

<sup>4</sup> Мудрий С.І., Кулик Ю.О., Якимович А.С. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч.-метод. посіб., Львів: ЛНУ



**Абсолютне датування.** Фактор часу є одним із найважливіших параметрів під час дослідження артефактів культурної спадщини. Тому датування є важливою складовою наукових досліджень у цій сфері. До методів абсолютного датування належать дендрохронологічний та природничі (радіоізотопний, археомагнітний, люмінесцентний та ін.) методи.

**Люмінесцентне датування.** Це абсолютний метод датування, який підходить для визначення віку археологічної кераміки, а також віку осадових шарів на археологічних об'єктах. Він ґрунтується на природному іонізуючому випромінюванні та люмінесцентних властивостях мінералів. Сліди природних радіоізоотопів наявні у всіх матеріалах, тому предмети постійно знаходяться під дією власного випромінювання, а також під дією випромінювання з навколишнього середовища. У стаціонарних умовах енергія цього іонізуючого випромінювання поглинається в речовині з фіксованою швидкістю ( $d$ ), тому загальна поглинута доза ( $DL$ ) визначається так званим рівнянням віку<sup>5</sup>:

$$DL = d \times t.$$

В умовах люмінесценції значення величини дози  $d$  можна оцінити вимірюваннями радіоактивності природних радіоізоотопів або використанням дозиметричних методів. Сумарну поглинуту дозу можна визначити вимірюванням люмінесценції досліджуваного матеріалу, в результаті чого можна встановити вік матеріалу ( $t$ ).

Іонізуюче випромінювання створює вільні носії (електрони і дірки) у мінералах, наявних у керамічних об'єктах. Ці вільні носії постійно проходять релаксацію, але невелика частина може потрапити в пастку, пов'язану з певними дефектами у кристалічній решітці. Якщо немає стимулюючих чинників, таких як світло або тепло, носії можуть залишатися в цих станах протягом сотень тисяч років залежно від особливостей станів захоплення. Чим довше вільні носії утворюються під дією випромінювання, тим більша загальна кількість захоплених в пастку носіїв. Тому це число може слугувати мірою загальної накопиченої дози  $DL$ . Захоплені електрони чи дірки підраховуються, коли вони звільняються під дією зовнішнього подразника, а потім проходить процес релаксації за рахунок фотонного випромінювання.

Найвідомішими видами стимульованої люмінесценції є термолюмінесценція (TL), де зовнішнім подразником є тепло, та оптично стимульована люмінесценція (OSL), де чинником стимуляції є світло обраних довжин хвиль. Стимулюючий чинник, як нагрівання та світло, випускає носії з пасток. Після ефективної стимуляції виникає ефект люмінесценції, а подальша стимуляція не приведе до подальшої люмінесценції, поки на мінеральні зерна знову не вплине іонізуюче випромінювання. Це означає, що будь-яка початкова люмінесценція внаслідок дози опромінення, поглинутої мінералами перед створенням керамічного об'єкта, зникає під час процесу подальшої технологічної обробки кераміки. Такі самі міркування стосуються й люмінесценції

імені Івана Франка, 2017. 252 с.

<sup>5</sup> Aitken M.J. Thermoluminescence Dating. London: Academic Press, 1985. 153 p.

мінералів із шару осаду, який був підданий впливу сонячного світла, перш ніж він був покритий іншим шаром.

Річна доза, поглинута мінеральними зернами, видобутими з об'єкта, що представляє інтерес, зазвичай визначається одним із двох різних дозиметричних методів. Прямий метод використовує високочутливі комерційні TL або OSL дозиметри для визначення зовнішньої дози, за рахунок  $\gamma$ -випромінювання. Набір TL або OSL гранул поміщають у місце, звідки зразок було отримано і залишають там протягом періоду до року. Альтернативні непрямі методи базуються на вимірюванні концентрації радіоактивних ізотопів, таких як  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  та  $^{40}\text{K}$  у зразку та оточуючому його середовищі<sup>6</sup>. Ефективні значення дози в цих методах, як правило, отримують застосуванням табличних коефіцієнтів перерахунку.

Незалежно від того, який тип дозиметричного методу використовується для визначення щорічної дози, слід враховувати такі чинники, як розподіл радіоактивності в зразку та його середовище, вміст води, космічне випромінювання та чутливість до  $\alpha$ -випромінювання. У найпростішому випадку радіоактивність розподіляється рівномірно всередині зразка. Проте на практиці часто ситуація є складнішою. Наприклад, коли зерна великого діаметра використовуються для вимірювання люмінесценції, розподіл може бути неоднорідним через специфічну радіоактивність різних мінералів. Шпат (особливо калієвий польовий) містить значну кількість  $^{40}\text{K}$ , а кварц зазвичай не містить ніяких слідів радіоактивності.

Загалом необхідно враховувати діапазон проникнення випромінювання в зернах. Діапазони  $\alpha$ -часточок настільки малий, що видалення зовнішнього шару зерен методом травлення загрожує не помітити дози  $\alpha$ -часточок в грубозернистих кварцових зернах. Максимальні діапазони  $\beta$ -часточок приблизно 2 мм. Для більшості об'єктів необхідні коефіцієнти ослаблення, щоб визначити неоднорідність поглиненої  $\beta$ -дози в об'ємі зерен. Проте у випадку з керамічними уламками видалення поверхневого шару завтовшки 2 мм достатньо, щоб не враховувати зовнішню  $\beta$ -дозу. Середній діапазон  $\gamma$  для природного випромінювання, як правило, становить близько 30 см. Це означає, що конкретний зразок поглинає  $\gamma$ -випромінювання, що походить від сфери діаметром 50—60 см. Неоднорідність навколишнього середовища у такому відносно великому об'ємі має бути врахована. У складніших випадках для оцінювання щорічної дози може знадобитися комп'ютерне моделювання транспортування іонізуючого випромінювання та його взаємодії з речовиною<sup>7</sup>.

**Радіоізотопне датування.** Метод визначення віку об'єктів, в складі яких є який-небудь радіоактивний ізотоп. Він базується на визначен-



<sup>6</sup> Oczkowski H.L., Przegietka K. Partial matrix doses for thermoluminescence dating. *Physica Scripta*. 1998. 58. P. 534—553. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/58/5/019>

<sup>7</sup> Guérin G., Mercier N., Adamiec G. Dose-rate conversion factors: update, *Ancient TL* 29, 2011. P. 5—8. [http://www.ecu.edu/cs-cas/physics/Ancient-Timeline/upload/ATL\\_29-1-Guerin.pdf](http://www.ecu.edu/cs-cas/physics/Ancient-Timeline/upload/ATL_29-1-Guerin.pdf)





ні частки (кількості) ізотопу, яка встигла розпастися за час існування зразка.

Уран-свинцевий метод — один із методів радіоізотопного датування. Застосовується для геологічних об'єктів, що містять уран. Він заснований на визначенні того, яка його частка встигла розпастися за час існування об'єкта (точніше з моменту кристалізації мінералів у ньому). Використовуються два ізотопи урану, ланцюжки розпаду яких закінчуються різними ізотопами свинцю; це сильно підвищує надійність методу. Цей метод вважається «золотим стандартом» геохронології. Він є одним із найдавніших і найретельніше розроблених способів радіоізотопного датування та, за якісного виконання, — найнадійніший метод для зразків віком близько сотень мільйонів років. За такого віку точність може бути досягнута близько 0,1 %. Метод дає можливість визначити навіть вік зразків, лише трохи молодших за Землю, внаслідок великого періоду напіврозпаду ізотопів урану, які використовуються. Велику надійність і точність забезпечує використання даних двох ланцюжків розпаду, а також деяких властивостей циркону — мінералу, що зазвичай застосовується для уран-свинцевого датування.

Свинець-свинцевий метод використовують переважно для визначення віку зразків, які складаються із суміші мінералів (його перевага у таких випадках перед уран-свинцевим методом пов'язана з високою рухливістю урану). Цей метод добре підходить для датування метеоритів, а також земних порід, що зазнали недавньої втрати урану. Він базується на вимірюванні вмісту трьох ізотопів свинцю:  $^{206}\text{Pb}$  (утворюється під час розпаду  $^{238}\text{U}$ ),  $^{207}\text{Pb}$  ( $^{235}\text{U}$ ),  $^{204}\text{Pb}$  (не радіогенний). Свинець-свинцевим методом визначали час формування планет Сонячної системи, тобто вік Землі.

Калій-аргоновий метод. У цьому методі використовується розпад ізотопу  $^{40}\text{K}$ , який становить 0,012 % природного калію. Період напіврозпаду  $^{40}\text{K}$  з урахуванням обох шляхів розпаду триває 1,25 млрд років. Це дає змогу датувати і зразки з віком, рівним віку Землі, і зразки віком в сотні, а іноді й десятки тисяч років.

Радіовуглецевий метод. Метод базується на розпаді вуглецю-14 і застосовується для об'єктів біологічного походження. Він дає можливість визначити час, який минув з моменту загибелі біологічного об'єкта і припинення обміну вуглецем з атмосферним резервуаром. Співвідношення вмісту вуглецю-14 до стабільного вуглецю ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 10^{-10}$ ) в атмосфері й тканинах тварин і рослин, які знаходяться в рівноважному обміні з нею, визначається потоком швидких нейтронів у верхній атмосфері. Період напіврозпаду  $^{14}\text{C}$  дорівнює  $5730 \pm 40$  років; наявні методики дають змогу визначати концентрації радіовуглецю в біологічних об'єктах на рівні приблизно в 1000 разів менше рівноважної атмосферної концентрації, тобто з віком до 10 періодів напіврозпаду  $^{14}\text{C}$  (близько 60 тис. років).

Коли живий організм гине, він перестає поглинати вуглець, а вже поглинутий  $^{14}\text{C}$  розпадається. Він радіоактивний, тому його концентрація з часом зменшується. Швидкість розпаду добре відома, вимірювання частки  $^{14}\text{C}$  в органічних матеріалах дає інформацію, необхідну

для розрахунку часу з моменту смерті організму. Основні принципи радіовуглецевого датування добре вивчені, оскільки метод у 1950-х роках запропонував В.Ф. Ліббі<sup>8</sup>. Вуглець-14 утворюється в атмосфері через взаємодію космічних променів з озотом-14, найбільш поширеним ізотопом. Вуглець-14 окиснюється до CO<sub>2</sub> і надходить у харчовий ланцюг шляхом фотосинтезу.

Через безперервний обмін вуглецю між живими організмами вся біосфера знаходиться в динамічній рівновазі, і організми містять невелику, але фіксовану пропорцію <sup>14</sup>C (зазвичай 1 атом вуглецю в 10<sup>12</sup>). Два стабільніших ізотопи — <sup>12</sup>C та <sup>13</sup>C — становлять відповідно 98,9 і 1,1 % загальної кількості. Звичайно, є декілька деталей, які ускладнюють весь процес, але, на щастя, практики, що займаються радіонуклідами, враховують це.

*Датування з використанням прискорювального мас-спектрометра.* Основним питанням, пов'язаним з радіоактивними речовинами, є те, як найкраще виявляти радіоактивні вуглецеві атоми. Спочатку використовували радіометричні методи, які виявляли радіоактивні ізотопи, аналізуючи випромінювання, яке вони випромінюють. Проте наприкінці 1970-х років розробили новий надчутливий інструмент — прискорювальну мас-спектрометрію (AMS). Метод є одним із найкорисніших інструментів для різних груп вчених: в археологічних, екологічних та геологічних дослідженнях, метод дає можливість дослідити органічні матеріалами, безпосередньо пов'язані з подіями, що вивчаються. На сьогодні це найпоширеніша методика визначення концентрації радіонуклідів.

Відновлення, отримання надійної інформації про процеси, що відбувалися в минулі часи — це сфера досліджень не лише історії. Багато інших галузей потребують аналогічної інформації. Це і геофізика, і споріднені дисципліни, такі як кліматологія, палеонтологія, фізика атмосфери, океану, і астрофізика, від фізики космічних променів до фізики Сонця, багато розділів біології, цілий спектр гуманітарних наук. Багато процесів, досліджуваних відповідними дисциплінами, дуже тривалі, розгортаються на шкалах в сотні й тисячі років, а то і більше. Тому без надійного знання таких процесів складно, а часто й просто неможливо робити прогнози на майбутнє, встановлювати причини тих чи інших явищ.

*Збереження пам'яток культурної спадщини та їх реставрація.* З точки зору застосування ядерно-фізичних методів, збереження культурної спадщини є комплексом матеріально-технічних заходів, що запобігають руйнуванню, заподіяння шкоди об'єктам культурної спадщини. Для збереження культурних артефактів використовують переважно іонізуюче випромінювання (як, власне, і в інших промислових та наукових процесах, включаючи стерилізацію косметики, медичних приладів, харчове опромінення та полімеризацію). Іонізуюче



<sup>8</sup> Libby W.F. Radiocarbon Dating. Chicago: University of Chicago Press, 1952. 138 p.





випромінювання у сфері культурної спадщини застосовують у вигляді двох процесів обробки: радіаційної дезінфекції та радіаційного зміцнення<sup>9</sup>. У першому процесі променева обробка використовується для дезінфекції від шкідників, в другому — опромінення є затверджувачем смол. Обидва процеси базуються на взаємодії частинок і фотонів високих енергій з речовиною. Фотони або електрони високих енергій можуть порушувати молекулярні зв'язки, ініціюючи подальші хімічні реакції.

Індуковане розщеплення у подвійній спіралі ДНК клітини є основною причиною ефекту біоцидного випромінювання та основою застосування, пов'язаної з «вбиванням» небажаних шкідників (бактерій, грибків або комах). Біоцидний ефект іонізуючого випромінювання спочатку використовували для стерилізації медичного обладнання для отримання матеріалів, що не містять живих мікроорганізмів. Пізніше його застосовували в опроміненні їжі для зменшення популяції мікроорганізмів або ліквідації шкідників. Однак багато предметів культурної спадщини також потерпають від атак різноманітних шкідників. Органічні складові (целюлоза, колаген або білки) є джерелами їжі для мікроорганізмів та комах. Неправильні умови зберігання призводять до активних атак навіть у музеях, архівах або бібліотеках. Такі атаки складно зупинити або викоринити через велику кількість предметів. Консерватори та реставратори можуть легко «вилікувати» окремі предмети іншими методами, але масова обробка колекцій без застосування радіаційних технологій є проблематичною.

Бажаний біоцидний ефект досягається опроміненням предметів протягом визначеного часу інтенсивним випромінюванням. Стійкість до радіації зазвичай характеризується однією із двох величин: так званою летальною дозою  $LD_{50}$  (смертельна доза, еквівалент дози, що знищує 50 % певної популяції) або  $D_{10}$  (поглинена доза, яка зменшує популяцію на 90 %). Смертна доза  $LD_{50}$  становить близько 10 Гр для ссавців і 100 Гр для комах, а  $D_{10}$  для грибків та бактерій може становити 1000 Гр та більше<sup>11</sup>. Одночасно слід вжити заходів для запобігання будь-якої небажаної деградації опромінених матеріалів.

Радіаційне зміцнення складається з двох етапів: 1) просочення синтетичними полімерами; 2) радіаційна полімеризація і/або зшивання. На першому етапі за допомогою циклів вакуум-підвищених тиск відбувається насичення артефакту смолами (полімерами, мономерами тощо). На другому етапі відбувається зшивка, або полімеризація, радіаційною обробкою. Ця методика особливо корисна для дерев'яних артефактів. Це дає нове життя дуже деградованим предметам, які неможливо зберегти іншими методами. Зміцнення опроміненням є незворотнім процесом, який також є доволі суперечливим, оскільки

<sup>9</sup> Bernard-Maugiron H., Coeuré P., Clermont-Joly M., Veyseyre P. Sauvé des eaux — Le patrimoine archéologique en bois, histoires de fouilles et de restaurations. ARCNUcléart. 2007. ISBN: 978-2-9529035-0-9; Coeuré P., Tran Q.K. Procédés radiochimiques pour la conservation des biens culturels. Actualité Chimique, 1999. 11. P. 141—143; Cortella L., Tran Q.K., Gluszewski W.J., Moise I.V., Ponta C.C. Nuclear Techniques for Preservation of Cultural Heritage Artefacts (brochure), IAEA Technical Cooperation Project — RER 8015: Using Nuclear Techniques for the Characterization and Preservation of Cultural Heritage Artefacts in the European Region. 2011.

змінює оригінальний матеріал. Воно припиняє подальший розпад, але робить це за рахунок зміни структури матеріалу та властивостей, включаючи масу і колір. На відміну від радіаційної дезінфекції, за якої єдиною метою є запобігання небажаній деградації матеріалів, що вимагає лише контролю дози опромінення, для радіаційного зміцнення важливим є ретельний контроль хімічних процесів, спричинених випромінюванням. Доза, швидкість опромінення та концентрація реагентів — це параметри, які потрібно контролювати. Необхідно також звернути увагу на те, що екзотермічні реакції можуть призвести до незворотного пошкодження артефактів теплом.

Опромінення здійснюється пучками електронів або  $\gamma$ -випромінюванням. Пучки електронів високих енергій (до 10 MeV) формуються прискорювачами. Установки  $\gamma$ -випромінювання використовують закриті джерела, що містять радіонукліди, такі як  $^{60}\text{Co}$  або  $^{137}\text{Cs}$ . Також є генератори рентгенівського випромінювання з енергією до 5 MeV. Виготовлення джерел випромінювання існує багато варіантів, але стандартними для всіх є системи для контролю експозиції опромінюваних об'єктів і захисту людей та обладнання від високоенергетичного випромінювання. Контроль часу експозиції зазвичай досягається тимчасовим екрануванням джерела випромінювання з використанням свинцю чи бетону (сухе зберігання) або водяного басейну (вологе зберігання) (у випадку  $\gamma$ -випромінювання) та відключенням або перериванням пучка у прискорювачах і генераторах рентгенівського випромінювання.

Опромінення проводиться у спеціальній кімнаті, захищеній бетонними стінами. Малі дослідні опромінювачі мають свої опромінювальні камери, екрановані свинцем, але малий розмір загалом робить їх непридатними для вивчення культурних артефактів. Опромінювачі промислового масштабу, як правило, мають конвеєрні системи для транспортування товарів та спеціальні приміщення для опромінення. Деякі предмети культурної спадщини (папір, текстиль, книги) можна завантажити у стандартні коробки, підвищуючи ефективність процедури.

Для технології радіаційного зміцнення необхідне додаткове обладнання: вакуумні/тискові камери або просочувальні ванни для введення матриці консолідації в матеріал, зберігання матеріалу до його подальшого опромінення.

**Успішні застосування ядерно-фізичних методів.** Прикладом успішного застосування методу PIXE є робота з дослідження елементного складу турецьких керамік та пігментів для різних кольорів декоративного розпису. Методом PIXE проаналізовано п'ять фрагментів турецької кварц-фрітової кераміки, знайдених на території Старого Арсеналу у Києві (рис. 2). За керамічним та нумізматичним матеріалом фрагменти датуються кінцем XVI — XVII ст.

У результаті досліджень сформулювали низку висновків. Глазури досліджуваної кераміки з певним допуском можна віднести до групи малонатрієвих. Основними речовинами, які дають синій відтінок, є оксиди міді та кобальту. Для червоного пігменту характерна збільше-





на концентрація оксиди калію та мангану. Зеленого кольору надають переважно оксиди міді та хрому. Зазначимо, що зразок КЗ має близький елементний склад за аналізу зеленої та синьої частин, що може свідчити про наявність деякого захисного шару, в основі якого є лише оксиди свинцю та силіцію. У подальшому планується перевірити цю гіпотезу, застосовуючи метод Резерфордівського зворотного розсіяння (RBS)<sup>10</sup>.

Методом рентгенфлуоресцентного аналізу проаналізовано 10 зразків, знайдених під час розкопок Церкви Спаса на Берестові у 2018—2019 рр. Серед цих зразків були 7 хрестів (один з них — хрест-енколпійон), вісімкоподібна бляшка, деталь замка у вигляді коника та фрагмент кинжалоподібної книжкової застібки.

Усі знахідки створені зі сплавів на основі міді (рис. 3), зразок 60 — з класичної олов'яної бронзи. Три зразки (хрести 54, 55, 61) є багатокомпонентними, що містять цинк, олово та свинець (2—8 мас. %). Такі багатокомпонентні сплави з цинком використовували для лиття хрестів з подальшим доопрацюванням. Ці сплави мають високі ливарні якості, а наявність цинку знижує газову пористість і надає литтю щільної гладенької поверхні. Такі сплави добре обробляються після лиття в холодному стані. Хрест 59 відлитий із поліметалевого сплаву Cu-Sn-Pb з домінуванням олова, а хрест 63 — з близькими концентраціями міді та олова.

За винятком зразків 54, 68 і 265, у виробках міститься арсен, але як домішка, що потрапила мимовільно, можливо, під час використання бронзового лому. Хрест 61 містить слідові кількості срібла.

Вісімкоподібна бляшка відлита з поліметалевого сплаву Cu-Sn-Pb. Перший аналіз продемонстрував, що у зразку близькі концентрації міді та олова. Результати аналізу також показали високу концентрацію фосфору. Висунуто припущення, що крім стандартних схем корозії бронзових зразків з формуванням хлоридів і сульфатів деякі зразки кородували з формуванням сполук фосфору. Для того, щоб перевірити, чи є фосфор у патині, а отже, чи брав він участь у її формуванні, проведено дослідження, у процесі механічно та за допомогою розчинників знімали покриття та патину та проводили елементний аналіз. Результати показують, що концентрація фосфору знижується за збільшення концентрації міді (рис. 4). Це призводить до змін в співвідношенні основних металів сплаву. Це показує, що як і під час корозії з формуванням хлоридів та сульфатів, сильніше уражується основний метал — мідь. Власний досвід та літературні дані свідчать, що схема корозії бронзи через сполуки фосфору трапляється нечасто, вважається, що це характерно для поховань<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Buhay O., Chmil L., Bilyk V., Zakharets M., Shulzhenko A., Ivakin H. PIXE analysis of Turkish ceramics from Kyivan excavations. Wrocław: Wydawnictwo Instytutu Archeologii i Etnologii PAN, 2020. P. 431—438.

<sup>11</sup> Мисько Ю., Бугай О. Визначення складу окремих металевих хрестів з археологічних досліджень на території Церкви Спаса на Берестові шляхом рентгенфлуоресцентного аналізу (РФА) // XXVI Міжнар. наук. конф. «Могилянські читання: Вивчення та збереження культурного надбання: до 95-річчя заснування Національного заповідника «Києво-Печерська лавра»», 9—10.12.2021. С. 156—161.



Прикладом датування із застосуванням прискорювальної мас-спектрометрії є датування в Інституті прикладної фізики НАН України деревини човна-довбанки із Сумського обласного краєзнавчого музею. Пробопідготовка була стандартною: механічне очищення, очищення циклами «луг-кислота», виділення целюлози і графітизація. Човен-довбанка знайдено у водоймі з прісною водою, тому на результати може впливати «ефект жорсткої води» (збіднення вмісту  $^{14}\text{C}$  внаслідок розчинення порід і, відповідно, візуальне зістарювання зразків). Річку Псел не досліджували на предмет впливу цього ефекту на результати абсолютного датування. Виходячи з цих фактів, для корекції впливу вищезгаданого ефекту було прийнято рішення застосувати калібрувальну криву «Marine 13» для визначення археологічного віку. Для обчислення використовували пакети Calib 14C та OxCal (рис. 5).

З ймовірністю 81,34 % визначено, що деревина, з якої виготовлений човен-довбанка, з 1688—1765 рр. (кінець XVII — середина XVIII ст.). З ймовірністю 99,99 % деревина човна з 1669—1830 рр.

На жаль, успішні історії застосування радіаційних технологій для збереження культурної спадщини в Україні на сьогодні нам не відомі. Однак Комунальний заклад «Центр консервації предметів археології» разом із Інститутом фізики НАН України розпочали підготовку інфраструктури для консервації вологої деревини з розкопок на Поштовій площі. Прискорювачі електронів Інституту будуть застосовані для радіаційної обробки деревини.





Oleksandr BUHAY,

Ph. D., Head of Sector,  
Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine (Sumy, Ukraine),  
Municipal Institution «Center for Conservation of Archaeological Objects»,  
(Kyiv, Ukraine)  
e-mail: alex.buhay@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6813-0413>

Evgenij M. OSADCHIJ,

Ph. D., Researcher,  
Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine (Sumy, Ukraine).  
ORCID: [hte-mail:osadchij.75@gmail.com](mailto:hte-mail:osadchij.75@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9143-110X>

Volodymyr BILYK,

Junior Researcher,  
Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine (Sumy, Ukraine).  
e-mail: [v.m.bilyk.sumy@gmail.com](mailto:v.m.bilyk.sumy@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7022-7188>

## 40 NUCLEAR TECHNIQUES FOR THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE

**ABSTRACT.** This work aims to acquaint a wide range of cultural heritage researchers with the potential of nuclear techniques for studying and preserving cultural heritage. The article highlights the main areas of application for nuclear-physical methods, including characterization, dating, preservation, and restoration. Examples such as the characterization of Turkish ceramics and pigments used in their decorative painting, as well as the characterization of metal artifacts discovered during excavations of the Church of the Savior at Berestove, illustrate the capabilities of particle-induced X-ray emission (PIXE) and X-ray fluorescence analysis. The dating of wood from a dugout canoe housed in the Sumy Regional Museum of Local Lore, using accelerator mass spectrometry, is presented as an example of absolute dating.

**KEYWORDS:** cultural heritage, nuclear-physical methods, characterization, absolute dating, preservation, restoration.

### REFERENCES

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2011). Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research, IAEA Radiation Technology Series, 2, IAEA, Vienna.
2. Buhay, O.M., Drozdenko, A.A., Zakharets, M.I., Ignatev, I.G., Kramchenkov, A.B., Miroshnichenko, V.I., Ponomarev, A.G. & Storizhko, V.E. (2015). Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility, *Physics Procedia*, 66, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.05.022>.
3. Bielikov, K.M. & Yurchenko, O.I. (2012). Renthenofluorestsentnyi analiz: Navchalnyi posibnyk. Kharkiv.
4. Mudryi, S.I., Kulyk, Yu.O. & Yakymovych, A.S. (2017). Renthenostrukturnyi analiz u materialoznavstvi: navch.-metod. posib. Lviv: LNU imeni Ivana Franka.
5. Aitken, M.J. (1985). Thermoluminescence Dating. London.
6. Oczkowski, H.L. & Przegietka, K. (1998). Partial matrix doses for thermoluminescence dating. *Physica Scripta*, 58, 534–553. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/58/5/019>
7. Guérin, G., Mercier, N. & Adamiec, G. (2011). Dose-rate conversion factors: update. *Ancient TL*, 29, 5–8. [http://www.ecu.edu/cs-cas/physics/Ancient-Timeline/upload/ATL\\_29-1-Guerin.pdf](http://www.ecu.edu/cs-cas/physics/Ancient-Timeline/upload/ATL_29-1-Guerin.pdf)
8. Libby W.F. (1952). Radiocarbon Dating. Chicago.
9. Bernard-Maugiron, H., Coeuré, P., Clermont-Joly, M., & Veysseyre, P. (2007). Sauvé des eaux — Le patrimoine archéologique en bois, histoires de fouilles et de restaurations. *ARCNUcléart*, ISBN: 978-2-9529035-0-9.
10. Coeuré, P. & Tran, Q.K. (1999). Procédés radiochimiques pour la conservation des biens culturels. *Actualité Chimique*, 11, 141–143.
11. Cortella, L., Tran, Q.K., Głuszewski, W.J., Moise, I.V. & Ponta, C.C. (2011). Nuclear Techniques for Preservation of Cultural Heritage Artefacts (brochure), IAEA Technical Cooperation Project — RER 8015: Using Nuclear Techniques for the Characterization and Preservation of Cultural Heritage Artefacts in the European Region.
12. Buhay, O., Chmil, L., Bilyk, V., Zakharets, M., Shulzhenko, A. & Ivakin, H. (2020). PIXE analysis of Turkish ceramics from Kyivan excavations. Wrocław.
13. Mysko, Yu. & Buhay, O. (2021). Vyznachennia skladu okremykh metalevykh khrestiv z arkeoholichnykh doslidzhen na terytorii Tserkvy Spasa na Berestovi shliakhom renthenofluorestsentnoho analizu (RFA). *XXVI Mizhn. nauk. konf. «Mohylianski chytannia: Vychennia ta zberezhenia kulturnoho nadbannia: do 95-richchia zasnovannia Natsionalnoho zapovidnyka “Kyievo-Pecherska laura”*», 156–161.

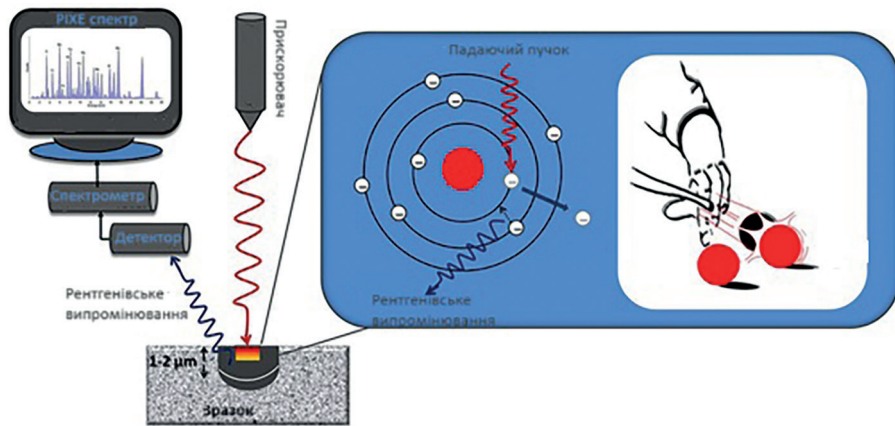


Рис. 1. Схема PIXE-експерименту



Рис. 2. Фрагменти керамічних виробів

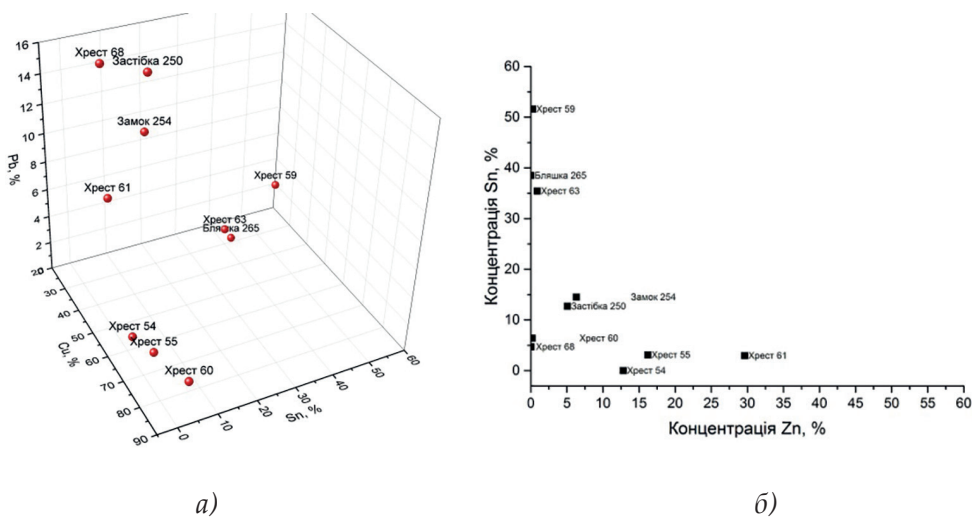


Рис. 3. Вміст олова, свинцю (а) та цинку (б) у сплавах міді зразків, знайдених під час розкопок Церкви Спаса на Берестові у 2018–2019 рр.







42

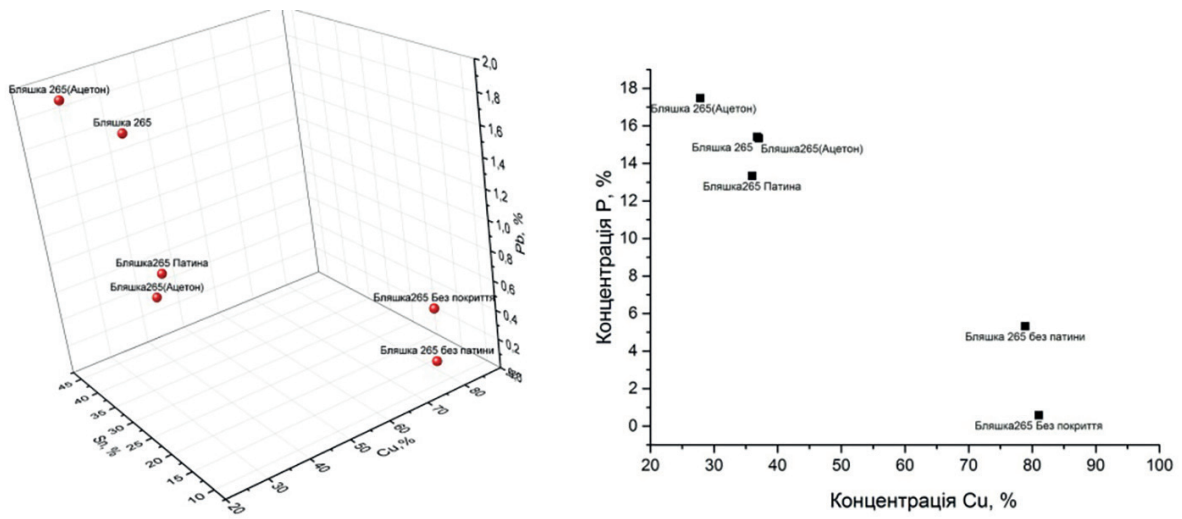


Рис. 4. Вміст олова, свинцю та фосфору в сплаві бляшки, знайденої під час розкопок Церкви Спаса на Берестові у 2018—2019 рр.

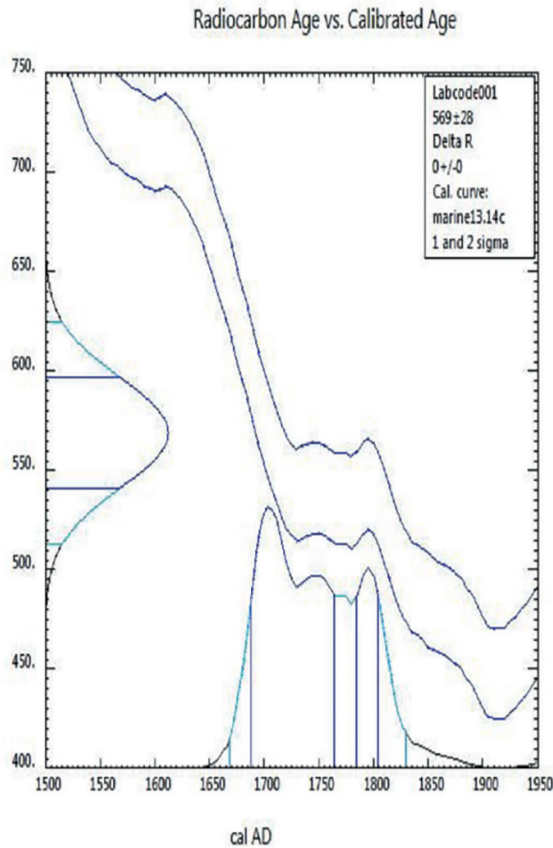


Рис. 5. Крива перерахунку ізотопного віку в календарний