

УДК 543.429.3+612.129.1+519.257

¹Стець М.В., н.с.; ¹Поп О.М., асп.;
²Сіксаї Л.Т., д.м.н., проф.; ²Сірчак Є.С., к.м.н., доц.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЯ КРОВІ ЛЮДИНИ В ПІСЛЯЧОРНОБИЛЬСЬКИЙ ПЕРІОД. ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ

¹Інститут електронної фізики НАН України, 88017, м. Ужгород, вул.
Університетська, 21, e-mail: oksana_por@i.ua

²ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 88000, м. Ужгород, вул. Підгірна, 46

Вступ

Не дивлячись на віддаленість подій 25-26 квітня 1986 року, коли трапилась аварія на ЧАЕС, інтерес до всього комплексу проблем, які ці події створили, не зникає. Стало зрозумілим, що кількість жертв аварії з часом більше не зростає, а спадає. Рівень радіоактивного забруднення довкілля, в певній мірі, суттєво понизився та стабілізувався. Зараз (на сьогодні) він повинен визначатись, і визначається довгоживучими нуклідами, на рівні активностей, що вписуються в флюктуацію фону. Цей висновок є бажаним і очікуваним, але не очевидним.

У Відділі фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України були виконані подальші виміри природної гамма-активності зразків крові ліквідаторів аварії на Чорнобильській АЕС 1986р. Ці виміри є спробою отримати кількісну оцінку змін у нуклідному складі зразків.

2. Експериментальна частина

2.1. Підготовка зразків. Був здійснений відбір зразків крові ліквідаторів – 16 чоловік (зразки s1 – s16). Маса зразків – від 15г до 23г. Ці зразки після переупаковки у вимірвальні полістиролові стакани герметизувались та вистоювались не менше двох тижнів для відновлення радіоактивної рівноваги між газом радоном ²²²Rn та його дочірніми радіонуклідами ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi.

2.2. Гамма-спектрометрія. Виміри виконано на гамма-спектрометричному комплексі, що складається з напівпровідникового Ge(Li) – детектора гамма-квантів ДГДК 100В, електронного та

програмного забезпечення SBS-40. В якості стандарту використані зразки атестованого джерела ОІСН на основі нукліда Eu152. Тривалість одного виміру складала від 0,5 годин до 2 годин.

Для покращення якості вимірів зразків з низькими рівнями гамма-активності розроблено та використано систему стабілізації та пониження фону ССПФ [1]. Було здійснено підготовку зразків, гамма-спектрометрію зразків, пошук аналітичних ліній та ідентифікацію радіоактивних нуклідів, визначення їх гамма-активностей.

2.3. Додаткова обробка даних. Окрім алгоритмів обробки експериментальних апаратурних гамма-спектрів що входять в пакет програмного забезпечення SBS-40, нами була здійснена додаткова обробка даних [2, 3]. Так, кожен із 16 зразків крові представлений 20 – 40 експериментальними апаратурними гамма-спектрами, що дозволяє використати техніку бутстреп-методів пониження статистичної похибки вимірів.

Для збільшення надійності виділення слабких ліній в апаратурних гамма-спектрах використано Фур'є- та Вейвлет-фільтрацію сигналів.

2.4. Похибки. Похибки складались в основному з випадкових похибок, спричинених пуасонівським радіоактивним розпадом. Для слабоактивних по своїй природі та невеликих по масі зразків крові вони могли бути значними і сягати 40%. Засобом пониження, як вказано, було використання комбінованого варіанту бутстреп-методики, який включає повторні виміри. Основним джерелом систематичних похибок була гамма-активність фону – довкілля детектора (захисту, повітря, тощо).

Окрім використання системи стабілізації та пониження фону ССПФ, яка суттєво понижує та стабілізує фон безпосередньо біля зразка, здійснювались, в разі потреби, повторні серії вимірів. Окрім цього була використана техніка фітінгу [1], яка дозволяє враховувати вклад фонові активності в активність зразка. Вказані засоби дозволяли понизити рівень похибок до рівня $\leq 10\%$, який на даному етапі слід вважати задовільним.

3. Результати експерименту

Експериментально встановлено, що на даний час (25 років після аварії) список нуклідів, ідентифікованих в зразках, складається з:

- в основному з окремих нуклідів радіоактивних рядів (сімейств) ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U ; також ^{137}Cs .
- епізодично довгоживучих уламків поділу, зокрема ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, а також ^{22}Na , ^{60}Co , ^{40}K , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{237}U .

3.1. Нуклідні спектри. У роботі ми приводимо частину основних даних у вигляді нуклідних спектрів активностей нуклідів – членів рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U (рис. 1 – 4). Таке представлення, на наш погляд, дозволяє у компактній формі здійснювати порівняльний аналіз.

3.2. Аналіз отриманих результатів.
Висновки. Позаяк у роботі ми привели в графічному чи табличному виді не всі дані, тому можемо говорити лише про якісні висновки. Наші висновки узгоджується з міркуваннями, приведеними у Вступі. Ми реєструємо гамма-активність нуклідів – членів рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{235}U , ^{238}U , як материнські нукліди рядів, є основним компонентом ядерного палива, яке було розсіяно в атмосфері Землі внаслідок потужної пожежі (горіння графіту) на аварійному блоці ЧАЕС. Не дивлячись на те, що основними компонентами палива по масі були ^{235}U , ^{238}U , ^{234}U , їх вклад в загальну активність та дозу був мізерним в порівнянні з активністю та дозою від уламків поділу.

Зараз, через 25 років, ситуація змінилась: вклад ^{235}U , ^{238}U , ^{234}U став основним. Ми розглядаємо отримані результати як достатньо представницькі, однак кількість зразків необхідно збільшити. Тоді ми зможемо робити більш обґрунтовані

висновки про типовість чи випадковість знаходження в організмі ліквідаторів ізотопів плутонію та інших нуклідів, характерних саме для зони відчуження. Для порівняння необхідна гамма-спектрометрія зразків крові здорових людей.

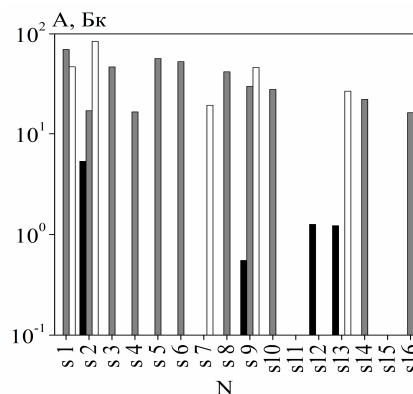


Рис. 1. Нуклідний спектр активностей А (Бк) ^{234}Th (чорний), $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (сірий), ^{230}Th (прозорий). N – номер зразка.

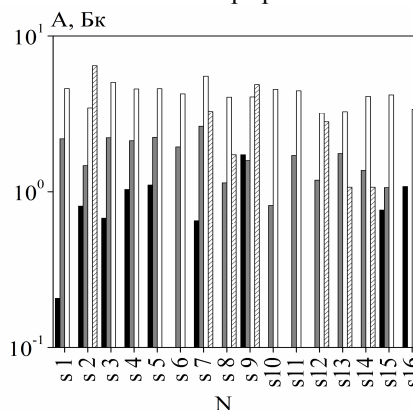


Рис. 2. Нуклідний спектр активностей А (Бк) ^{226}Ra (чорний), ^{214}Pb (сірий), ^{214}Bi (прозорий), ^{210}Pb (прозорий з рисками). N – номер зразка.

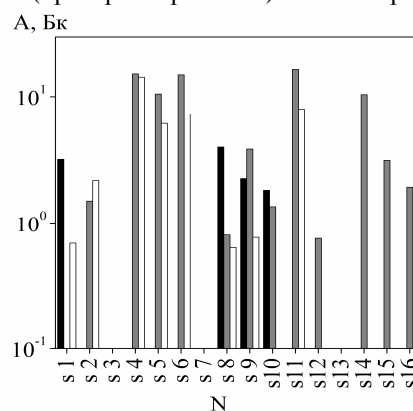


Рис. 3. Нуклідний спектр активностей А (Бк) ^{235}U (чорний), ^{231}Pa (сірий), ^{231}Th (прозорий). N – номер зразка.

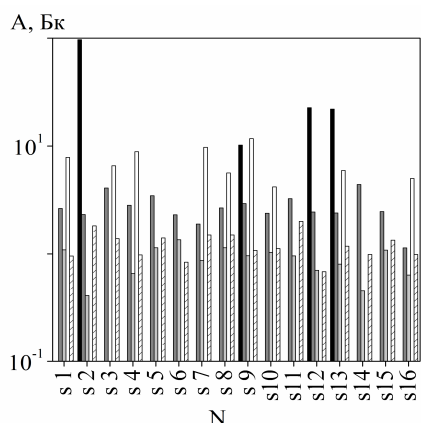


Рис. 4. Нуклідний спектр активностей A (Бк) ^{232}Th (чорний), ^{228}Ac (сірий), ^{212}Pb (світло-сірий), ^{212}Bi (прозорий), ^{208}Tl (прозорий з рисками).
 N – номер зразка.

4. Метод стандартних множин

Метод стандартних множин (МСМ), розроблений нами на основі гамма-спектрометричних методик визначення вмісту нуклідів в зразках, дозволяє отримати додаткову інформацію, зокрема часові параметри. Деякі з них можуть тлумачитись, як тривалості існування. МСМ може виявитись корисним у дослідженнях крові людини. Тому розглянемо спочатку основи методу; потім розглянемо приклади його застосування.

4.1. Події. Зразки, які ми досліджуємо, є представниками середовищ та процесів, що там відбуваються. Склад та вміст нуклідів в зразку є предметним об'єктом дослідження методик ядерної гамма-спектрометрії, з якими ми працюємо.

Тут ми розглядаємо тільки нукліди – члени рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U .

Нукліди з різних рядів ніяк не пов'язані між собою, тому ми розглядаємо кожен ряд незалежно від іншого ряду.

Вважаємо, що зміна у зразку внаслідок того чи іншого впливу на нього і як представника певного середовища та/або процесу – призводить до зміни його нуклідного складу. Зареєстрований факт зміни нуклідного складу зразка будемо називати *подією* [5].

4.2. Впорядковані множини нуклідів. Особливістю нуклідів рядів ^{232}Th (і відповідно ^{235}U , ^{238}U) є те, що їх множина є впорядкованою множиною – системою, бо

має емерджентну властивість – всі нукліди одного ряду генетично-пов'язані взаємним ядерним перетворенням (утворенням / розпадом). Генетичний зв'язок робить множину нуклідів системою.

Множини нуклідів у вимірних зразках є резон назвати *експериментальними множинами*.

Відповідно, кількісною характеристикою цих експериментальних множин є *експериментальні нуклідні спектри (ЕНС)* їх активностей A – впорядковані послідовності експериментальних значень активностей A нуклідів рядів.

4.3. Утворення стандартних множин. Ми будемо працювати з активностями A ; кількість ядер $N = A / \lambda$, де λ – стала розпаду.

До події активність $A_n(T)$ кожного n -го нукліда ряду в експериментальному нуклідному спектрі можна представити узагальненим для випадку розгалужених ланцюгів виразом – розв'язком системи диференціальних рівнянь Батемана – Рубінсона [8, 9]:

$$A_{ne}(T) = A_{10} \cdot \sum_j \Pi_j b_j \sum_i C_i e^{\lambda_i T} \quad (1),$$

де A_{10} – початкові значення активності; b_i – коефіцієнти розгалуження (які ми назвемо «внутрішніми» бренчінгами i , значення яких є ядерними константами); $b_i \leq 1$; C_i – коефіцієнти, що залежать від λ .

Сукупність всіх умов та розв'язків (1) назвемо для зручності РБР1. Множину нуклідів ряду, що задовольняє РБР1, ми називаємо *стандартною множиною ряду (стандартною множиною)*.

4.4. Утворення нестандартних множин. Можна показати, що внаслідок елементарної події активність $A_n(T)$ кожного n -го нукліда ряду в експериментальному нуклідному спектрі зразка можна представити сумою *одноіменних* активностей [8]:

$$A_n(T) = A_{ne}(T_e) + \sum_e K_e \cdot A_{ne}(T_e) \quad (2),$$

де K_e – «зовнішній» бренчінг (коефіцієнт розгалуження, який задається (визначається) зовнішніми факторами, зокрема способом впливу на зразок; $0 \leq K_e \leq 1$).

Перший доданок $A_{ne}(T_e)$ у сумі (2) – це активність n -го нукліда ряду ^{232}Th (відповідно для ^{235}U , ^{238}U), що описується (1) і тому цей нуклід є членом стандартної

множини. Цей доданок можна також назвати стандартною частиною суми (2).

Другий доданок в сумі (1) – це сума активностей ядер $K_e \cdot A_{ne}(T_e)$ одноіменних нуклідів нових (коротких) рядів, що могли утворитись внаслідок події. Напр., активність ^{230}Th = активність ^{230}Th ряду ^{238}U + активність ^{230}Th ряду ^{230}Th . Кожен із членів суми активностей – вираз, подібний виразові (1), бо є виразом для розрахунку стандартної множини.

Таким чином, *нестандартні множини* – це множини нуклідів ряду, активність яких описуються виразом (2).

4.5. *Метрологія методу.* Маючи експериментальну множину нуклідів, ми знаходимо в ньому стандартні та нестандартні множини. Знайшовши їх та, визначивши відповідні нуклідні спектри, що отримуються на основі розрахунків (1), і є, як видно, часовими залежностями активностей $A_{M \text{ ГАН}}(T_e)$. Для кожного нукліда ряду – ми можемо, в принципі, ці множини поміряти. Наша впевненість ґрунтується, зокрема, на незмінності закону радіоактивного розпаду/утворення ядер, де б ми його не використовували: в моделюванні, чи в зразкові.

Кількісною характеристикою стандартних множин будуть *модельні нуклідні спектри (МНС)* активностей A . Модельні нуклідні спектри отримуються на основі розрахунків (1).

Кількісною характеристикою стандартних множин, як частини експериментальних множин, є експериментальні нуклідні спектри активностей. Таким чином, ми стандартні множини можемо:

- визначити експериментально, визначивши їх експериментальний нуклідний спектр;
- розрахувати, використавши (1).

Цей факт є основою для можливості вимірювання, бо є виконанням однієї із засад метрології – аксіоми однорідності величини та її міри (стандарта). Тому наше вимірювання може полягати в порівнянні двох однорідних величин: експериментального нуклідного спектра (стандартної чи нестандартної множини) з модельними нуклідним спектром, який повинен виконувати функцію стандарта.

4.6. Таблиця стандартів.

Розрахувавши значення активностей в (1) для достатньо великої кількості точок часу T_e , ми можемо отримати часові залежності модельних нуклідних спектрів для всіх нуклідів – рядів сімейств ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Часові залежності для цих сімейств приведені на рис. 5-7.

Отримавши, таким чином, таблицю модельних значень активностей, ми, здійснивши нескладну процедуру прив'язки до експериментального нуклідного спектра, отримуємо таблицю «модельно-експериментальних» значень активностей A , яку назвемо таблицею стандартів $\{\text{МНС } A(T_e)\}$.

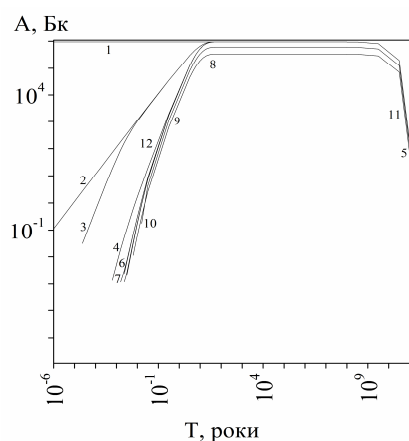


Рис. 5. Часові залежності активностей стандартної множини ^{232}Th (1 – ^{232}Th , 2 – ^{228}Ra , 4 – ^{228}Ac , 5 – ^{228}Th , 6 – ^{224}Ra , 7 – ^{220}Rn , 8 – ^{216}Po , 9 – ^{212}Pb , 10 – ^{212}Bi , 11 – ^{212}Po , 12 – ^{208}Tl)

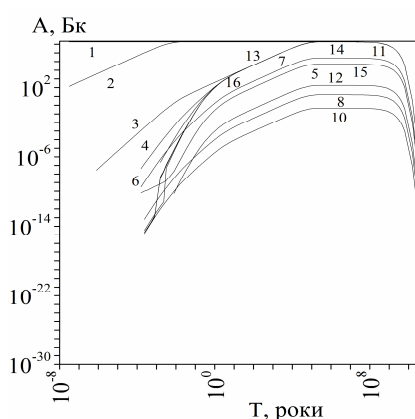


Рис. 6. Часові залежності активностей стандартної множини ^{235}U (1 – ^{235}U , 2 – ^{231}Th , 3 – ^{231}Pa , 4 – ^{227}Ac , 5 – ^{223}Fr , 6 – ^{227}Th , 7 – ^{223}Ra , 8 – ^{219}Rn , 9 – ^{215}Po , 10 – ^{211}Pb , 11 – ^{211}Bi , 12 – ^{207}Tl , 13 – ^{219}At , 14 – ^{215}Bi , 15 – ^{215}At , 16 – ^{211}Po)

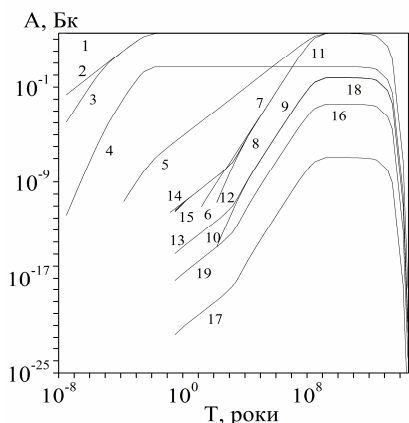


Рис. 7. Часові залежності активностей стандартної множини ^{238}U (1 – ^{238}U , 2 – ^{234}Th , 3 – $^{234\text{m}}\text{Pa}$, 4 – ^{234}Pa , 5 – ^{234}U , 6 – ^{214}Po , 7 – ^{210}Pb , 8 – ^{210}Bi , 9 – ^{230}Th , 10 – ^{226}Ra , 11 – ^{222}Rn , 12 – ^{218}Po , 13 – ^{214}Pb , 14 – ^{214}Bi , 15 – ^{218}At , 16 – ^{210}Tl , 17 – ^{206}Hg , 18 – ^{210}Po , 19 – ^{206}Tl).

Отриману таблицю, розраховану з певним кроком дискретизації значень T_e , можна, в разі потреби, деталізувати, розраховуючи нові рядки – значення стандартів МЕНС $A(T_e)$ для нових значень T_e .

Можна сказати, що отримана нами таблиця стандартів $\{\text{МЕНС } A(T_e)\}$ – це таблиця модельних часових еволюційних залежностей $A_{\text{МЕГАН}}(T_e)$, нормована («прив'язана») до конкретних експериментальних умов. Вкажемо, що таблиці модельних часових еволюційних залежностей $A_{\text{МЕГАН}}(T_e)$ отримані на основі розрахунків та умов розрахунків РБР1 з використанням рівняння (1). Стартова кількість ядер материнських радіонуклідів (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U) = $6,022 \cdot 10^{23}$ ядер (1 моль – число Авогадро).

4.7. Вимірювання стандартних множин. Кожен рядок отриманої нами таблиці стандартів $\{\text{МЕНС } A(T_e)\}$ є, як видно, стандартом – модельним нуклідним спектром активностей нуклідів стандартної множини, визначений для моменту часу T_e . Тому, знайшовши в таблиці стандартів рядок, рівний по значенню із експериментальним нуклідним спектром, ми здійснили його вимірювання.

4.8. Тривалість існування стандартної множини. Окремим та цікавим результатом вимірювання є час T_e . Більш точно: експериментальному нуклідному спектру ставиться у відповідність часова ордината T_e

стандарта МЕНС $A(T_e)$, з яким цей спектр порівнюється. Ми можемо тлумачити час T_e як тривалість існування стандартної множини, для якої виконувалось порівняння двох спектрів. Ця стандартна множина могла з'явитись в результаті події.

4.9. Невизначеності. Активності нуклідів, що складають експериментальний нуклідний спектр – експериментальні величини, тобто визначені з певною похибкою. Сукупність цих похибок впливає на вимір цього спектра в таблиці стандартів.

Крім цих, випадкових, похибок слід вважати на наявність і систематичних похибок різних типів, зокрема інтерференцій.

Тому для активності $A_I(T_m)$ нукліда слід записати нерівності:

$$A_K(T_{emin}) \leq A_I(T_m) \leq A_L(T_{emax}) \quad (3)$$

$A_K(T_{emin})$ належить стандарту МЕНС $A_K(T_{emin})$, який обмежує $A_I(T_m)$ «знизу»;

$A_L(T_{emax})$ належить стандарту МЕНС $A_L(T_{emax})$, який обмежує $A_I(T_m)$ «зверху»;

$A_I(T_m)$ належить експериментальному нуклідному спектру ЕНС $A_I(T_m)$.

4.10. Вимірювання нестандартних множин. Ми вказали на причину появи нестандартних множин в зразках. Коли здійснюється вимір, невідомо, з якою множиною мають справу – стандартною, що представлена виразом (1) чи нестандартною, яка представлена виразом (2). Тому правильним буде використання виразу (3) для визначення активності $A_I(T_m)$ нукліда, незалежно належить ця активність нукліду стандартної чи нестандартної множини.

4.11. Визначення часового проміжку ΔT . Вибравши стандарт МЕНС $A(T_{emin})$ та стандарт МЕНС $A(T_{emax})$ із множини всіх їх можливих значень залежностей (тобто із таблиці стандартів $\{\text{МЕНС } A(T_e)\}$), ми вибрали значення часів T_{emin} , T_{emax} . Ці значення можна інтерпретувати як тривалості існування стандартної множини.

Маючи значення T_{emin} , T_{emax} можна визначити часовий проміжок ΔT :

$$\Delta T = T_{emax} - T_{emin} \quad (4)$$

Значення T_{emin} , T_{emax} та часовий проміжок (4) вибирають, беручи до уваги значення похибок (невизначеностей). Отже, замість одного точного значення T_e , ми повинні працювати з проміжком ΔT , який це значення T_e включає.

5. Застосування методу стандартних множин в дослідженні радіонуклідного складу зразків крові

Відомо, що кров з точки зору нуклідного складу є динамічним об'єктом; тільки з певною обережністю можна казати про її фіксований нуклідний склад («консерватизм складу»), зокрема про існування стандартних множин (впорядкованих множин нуклідів – членів рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U). Разом з тим гамма-спектрометрія крові підтверджує вміст в ній радіоактивних нуклідів, які є (тривалий час) і в організмі людини. Таким чином, радіонуклідний склад крові є інформативним об'єктом дослідження, бо корелює з вмістом радіонуклідів в організмі. Тому ми коротко розглянемо можливості методу стандартних множин в цій предметній області.

5.1. *Аналіз експериментальних нуклідних спектрів.* Представниками стандартних чи нестандартних множин є їх нуклідні спектри, що складають експериментальні нуклідні спектри активностей. Таким чином, мова йтиме про аналіз експериментальних нуклідних спектрів ЕНС. На рис. 8 – 10 наведені експериментальні нуклідні спектри активностей ЕНС зразка s9.

5.2. *Оцінка нестандартності ЕНС.* Визначатимемо експериментальні множини ^{232}Th та ^{238}U , бо вони виявлені та зареєстровані в зразку крові. Почнемо з експериментальної множини ^{232}Th . Перевірка умови (3) графічно виглядає у побудові рисунків: стандартів МЕНС $A(T_{emin})$ та МЕНС $A_L(T_{emax})$, знайдених в таблиці стандартів $\{ \text{МЕНС } A(T_e) \}$, які ми будемо зображати на рисунках світлими прямокутниками; чорними прямокутниками ми будемо зображати експериментальні нуклідні спектри.

Аналіз рис. 8 дозволяє вважати, що експериментальні множини ^{232}Th – дійсно стандартні, тому що не виявлено аномально великих (або навпаки, аномально низьких) значень активностей в їх експериментальних нуклідних спектрах.

Для експериментальної множини ^{238}U (рис. 9) ситуація дещо інша: аномально виділяється нуклід ^{230}Th в її експериментальному нуклідному спектрі. Це означає, що експериментальна множина ^{238}U

– нестандартна, тому ми повинні здійснити декомпозицію: віднімання стандартної множини ^{238}U від експериментальної множини ^{238}U , і цим отримати (виділити) стандартну множину ^{230}Th . Результати декомпозиції приведені на рис. 10.

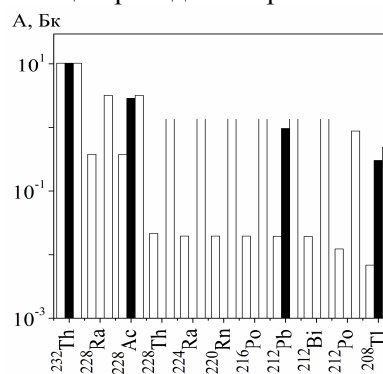


Рис. 8. Експериментальний нуклідний спектр А активностей зразка s9 (виділено чорним) та МНС А стандартів множини ^{232}Th (світлі прямокутники). ΔT (роки) = 0,3 – 3.

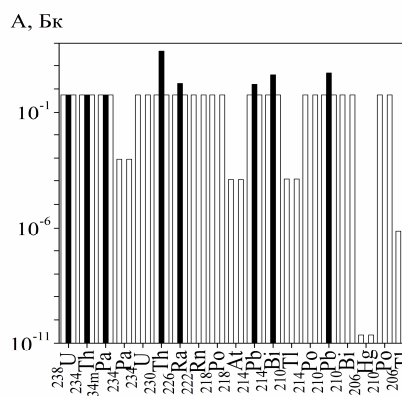


Рис. 9. Експериментальний нуклідний спектр А активностей зразка s9 (виділено чорним) та МНС А стандартів множини ^{238}U (світлі прямокутники).

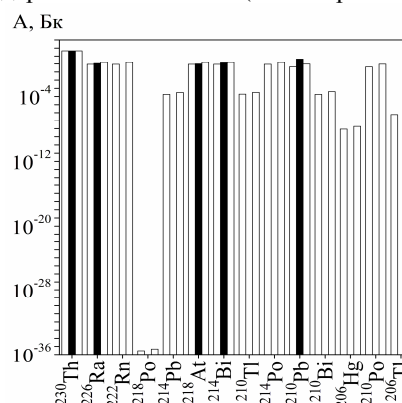


Рис. 10. Експериментальний нуклідний спектр А активностей зразка s9 (виділено чорним) після декомпозиції (віднімання) та МНС А стандартів множини ^{230}Th (світлі прямокутники). ΔT (роки) = 63 – 79.

Таблиця. Результати визначення часового проміжку ΔT зразків крові.

	$\Delta T_{232\text{Th}}$, роки	похиб. $\delta_{\Delta A}$, %	$\Delta T_{230\text{Th}}$, роки	похиб. $\delta_{\Delta A}$, %
s2	0,031-3,17	2	47 – 63	7
s9	0,31-3,17	2	63 – 79	6
s12	0,31-3,17	4	-	-
s13	0,31-3,17	4	79-110	3

Висновки

Кінцевим результатом вимірювання стандартних множин є отримання часових проміжків ΔT . Їх значення приведені у підписах під рисунками, та у таблиці. Відносні похибки $\delta_{\Delta A}$ визначення часового проміжку ΔT розраховані у припущенні, що статистика реєстрованих сигналів – це пуасонівська статистика, та що відносна похибка визначення активностей рівна 10%.

Значення часових проміжків ΔT стандартної множини ^{232}Th співрозмірні із віком зразків, і свідчать, що ця множина «молода». Часові проміжки ΔT стандартної множини ^{230}Th співрозмірні із віком ліквідаторів.

Ми не будемо інтерпретувати отримані значення, які нам здаються коректними та цікавими, однак можуть мати і інше тлумачення. Справа також і в тому, що ми вперше розглядаємо величину «тривалість існування стандартної величини», причому в такому об'єкті, як кров. Тільки збільшення експериментальних даних дозволить нам отримати більшу впевненість в результатах. Разом з тим, часовий проміжок ΔT , як часовий параметр, на наш погляд, надає результатам гамма-спектрометрії зразків крові нове інформаційне «звучання».

Стаття надійшла до редакції: 11.09.2013

GAMMA-SPECTROMETRY OF THE HUMAN BLOOD IN THE POST-CHERNOBYL PERIOD. DETERMINATION OF TIME

Stec M.V., Pop O.M., Siksay L.T., Sirchak E.S.

The results of gamma spectrometry blood 16 liquidators of the Chernobyl accident are given. The concludes about certain changes for 25 years in the list of gamma-active nuclides, registered in the blood samples. The short description is given and considers the possibility of a new method – the standard sets method for determining the age of the standard sets (ordered sets of nuclides – members of the series ^{232}Th , ^{235}U and ^{238}U). The continued existence of standard sets in blood samples is an interesting experimental result.

Список використаних джерел

1. Юркуц Ю.Ю., Поп О.М., Стець М.В., Маслюк В.Т. Система стабілізації та пониження фону в гамма-спектрометричному комплексі // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2011. – Вип. 30. – С. 188-196.
2. Поп О.М. Використання Фур'є- та Вейвлет-фільтрації при обробці слабих піків в апаратурних гамма-спектрах // Тези доповідей Міжнародної наукової конференції молодих вчених і аспірантів «ІЕФ'2013». 20-23 травня 2013 р. Ужгород. – 2013 – С. 173.
3. Поп О.М. Використання бутстреп-методів у деяких задачах ядерної гамма-спектрометрії // Тези доповідей Міжнародної наукової конференції молодих вчених і аспірантів «ІЕФ'2013». 20-23 травня 2013 р. Ужгород. – 2013 – С. 174.
4. Поп О.М., Стець М.В. Статистичні характеристики термічного впливу на вміст нуклідів рядів торію-232, урану-238 та К-40 в пробах отримання кераміки // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Хімія. – 2010. – Вип. 24. – С. 197-203.
5. Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 576 с.
6. Murrell M. Uranium-series geochemistry: by B. Bourdon, G. M. Henderson, C. C. Lundstrom and S. P. Turner (eds.) // Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2003. – Vol. 52 – 656 p.
7. Маслов И.А., Лукницкий В.А. Справочник по нейтронному активационному анализу. – 1971. – 212 с.
8. Поп О.М., Стець М.В. Моделі еволюції множин радіоактивних нуклідів рядів торію 232, урану 235, урану 238 та їх застосування // Доповіді Національної академії наук України. – 2013. – № 4. – С. 65-71.