

М. Д. Бондарьков¹, В. О. Желтоножський², Д. Є. Мизніков²,
А. М. Саврасов^{2,*}, В. І. Слісенко², М. В. Стрільчук²

¹ Державна науково-дослідна установа «Чорнобильський центр з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології», Славутич, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: asavrasov@kinr.kiev.ua

СПЕКТРОМЕТРИЯ ⁹⁰Sr

Розроблено спектроскопічний метод, заснований на вимірюванні бета-спектрів, який враховує фізико-хімічний стан досліджуваних об'єктів і нестабільність роботи електронних систем у польових умовах. Цей метод дає змогу проводити дослідження концентрації ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs в різних об'єктах при зміні співвідношення ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr від 1 до 100 з невизначеністю кращою за 20 %. Розроблено методику, що враховує зміну густини неживих об'єктів та ґрунтується на зміщенні положення піка конверсійних електронів ¹³⁷Cs. Верифікація методики порівняно з радіохімічними вимірюваннями ⁹⁰Sr у зразках ґрунту показала повне узгодження в межах 10 - 15 %, при зміні активності в зразках на чотири порядки.

Ключові слова: бета-спектрометрія, методики реєстрації ⁹⁰Sr, калібрувальні джерела ⁴⁰K, ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs, радіохімічні методи.

1. Вступ

Ізотопи стронцію присутні в навколишньому середовищі як в глобальному масштабі від випробувань атмосферної ядерної зброї, так і в місцевому від санкціонованих або несанкціонованих викидів від ядерних об'єктів і ядерних аварій. Зокрема ⁹⁰Sr є одним з найнебезпечніших радіонуклідів внаслідок його тривалого фізичного і біологічного періоду напіврозпаду, накопичення в кістковій тканині і високоенергетичних бета-частинок з розпаду його дочірнього нукліда ⁹⁰Y, що призводить до пошкодження кісткового мозку. У той же час доволі складною проблемою є його реєстрація, оскільки даний нуклід розпадається лише з випромінюванням електронів [1, 2].

Один з перших спектроскопічних методів реєстрації ⁹⁰Sr ґрунтується на вимірюванні бета-частинок ⁹⁰Y при відсіканні низькоенергетичних електронів за допомогою фільтрів. Вимірювання проводяться аналогічно вимірюванню виходу електронів згідно з радіохімічними процедурами [3, 4]. Однак, у зразках, як правило, присутні фонові радіонукліди з рядів торію і урану, які можуть вносити значні похибки. Тому цей метод необхідно об'єднувати із спектроскопічними вимірюваннями гамма-спектрів досліджуваних зразків і оцінювати внесок у бета-спектри фонових радіонуклідів. Крім того в багатьох зразках одночасно з ⁹⁰Sr присутній ¹³⁷Cs. Бета-спектр ⁹⁰Sr аналогічний бета-спектру ¹³⁷Cs, однак при розпаді ¹³⁷Cs присутні електрони з гранич-

ною енергією 1175 кеВ з виходом 5,6 %, конверсійні електрони з енергією 630 кеВ з виходом 10 % і характеристичне випромінювання з енергіями 32 і 36 кеВ із сумарним виходом 7 %. Відзначимо, що проникна здатність К_x барію відповідає проникній здатності електронів з енергією 3 - 4 МеВ. Усе це привносить значні похибки при вимірюванні виходу електронів за допомогою фільтрів.

Останнім часом значний розвиток отримали спектроскопічні методи, засновані на вимірюванні спектра електронів на різних сцинтиляційних спектрометрах з тонким вхідним вікном [5]. Це пов'язано з тим, що в даний час внаслідок Чорнобильської аварії в навколишнє середовище потрапила велика кількість радіонуклідів – продуктів поділу. Тому необхідно проводити численні вимірювання проб навколишнього середовища.

Аналіз гамма-спектрів показує, що в основному радіонуклідами, супутніми ⁹⁰Sr, є ¹³⁷Cs та ¹⁵⁴Eu.

Внесок ¹⁵⁴Eu становить 0,2 - 0,3 % порівняно з ¹³⁷Cs, при цьому тільки дві групи електронів з граничними енергіями 0,8 МеВ (вихід 20 %) і 1,8 МеВ (вихід 10 %) дають внесок у спектр електронів, який збігається зі спектром електронів ⁹⁰Y. Таким чином, при співвідношенні ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr – 100/1 похибка за рахунок ¹⁵⁴Eu при оцінці активності ⁹⁰Sr не перевищуватиме 5 - 7 % і її можна не враховувати.

У цілому, основними радіонуклідами, що формують дози опромінення, за винятком трансураничних нуклідів, є ^{90}Sr і ^{137}Cs . Тому в перших роботах [6] для визначення активності використовувалися тільки калібрувальні джерела ^{90}Sr і ^{137}Cs . Однак при роботі зі зразками з підвищеним вмістом калію значний внесок у спектр

електронів вносить ^{40}K , який входить до суміші ізотопів калію (0,0117 %). Тому для успішного опису бета-спектрів необхідно використовувати три калібрувальних джерела (фантоми) ^{40}K , ^{90}Sr і ^{137}Cs . Крім того, фантом ^{40}K може імітувати ^{90}Sr якщо зміщувати розподіл на 150 кеВ. Схеми розпаду ^{40}K , ^{90}Sr і ^{137}Cs наведено на рис. 1.

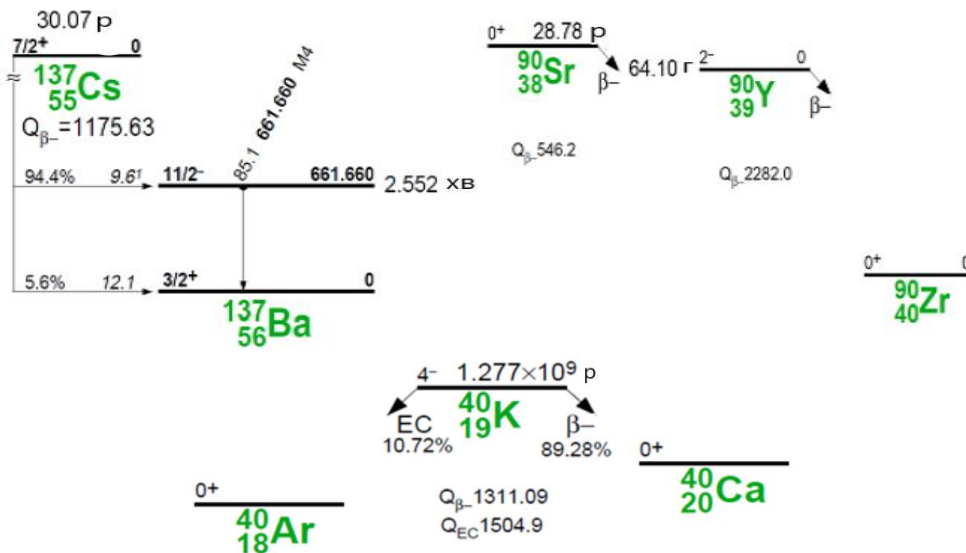


Рис. 1. Схеми розпаду ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{40}K [7]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Виходячи з вищевикладеного, метою даної роботи є розробка спектрометричного методу вимірювання стронцію з використанням трьох калібрувальних джерел.

2. Методика і результати вимірювань

Розроблений спектроскопічний метод ґрунтується на вимірюванні енергетичного спектра електронів, які супроводжують розпад ^{40}K , ^{90}Sr та ^{137}Cs . При розпаді ^{90}Sr випромінюються дві групи електронів з граничними енергіями 0,55 і 2,3 МеВ, а при розпаді ^{137}Cs випромінюються електрони з граничною енергією 0,5 МеВ і конверсійні електрони від γ 661 кеВ (див. рис. 1).

Технічні проблеми при вимірюванні ^{90}Sr зумовлені пробігом електронів у речовині і тим, що електрони з радіоактивного розпаду мають неперервний розподіл від 0 до граничної енергії ($E_{\text{гр}}$).

Чим товщий шар реєстрації електронів у бета-детекторі, тим вище його ефективність (а з нею і оперативність оцінки ^{90}Sr). Однак через присутність у зразках значних активностей ^{137}Cs , ^{40}K і підвищеного зовнішнього радіаційного фону збільшується ймовірність реєстрації гамма-квантів (γ 661 кеВ), комптонівських гамма-квантів і, особливо, рентгенівського випромінювання K_{α} барію, що ускладнює аналіз бета-спектра. Крім значної домішки ^{137}Cs , у зразках, відібраних у зонах зі щільністю забруднення 1 - 5 Ки/км²

значний внесок у повний бета-спектр починають вносити електрони ^{40}K ($E_{\text{гр}} = 1,3$ МеВ), особливо якщо вносяться калійні добрива. У таких умовах слід використовувати більш тонкий детектор, товщина шару реєстрації в якому дорівнювала б пробігу бета-електронів ^{90}Y . Стандартні дослідження проводяться з використанням сцинтиляційного детектора, товщина якого близько 1 мм і діаметр 76 мм. У створеному методі використовується сцинтиляційний детектор з тонким входним вікном, що забезпечує проходження електронів з енергією в діапазоні 100 - 1500 кеВ. Проводиться реєстрація спектрів електронів і ці спектри порівнюються зі спектрами калібрувальних джерел (фантомів). Для калібрування по ефективності експериментальних бета-спектрів виготовляються стандартні джерела ^{40}K , ^{90}Sr і ^{137}Cs , які мають об'єм і щільність, близькі до експериментальних зразків.

Обробка експериментальних спектрів проводиться методом порівняння їх з калібрувальним спектром, тобто в даному випадку – зі спектрами, отриманими на цьому ж спектрометрі з використанням стандартних джерел ^{40}K , ^{137}Cs та $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (фантомів). На рис. 2 представлено бета-спектри досліджуваних зразків, виміряні на такому спектрометрі.

Існують різні методи обробки таких спектрів. На наш погляд найбільш ефективним способом є метод, при якому спектри калібрувальних джерел

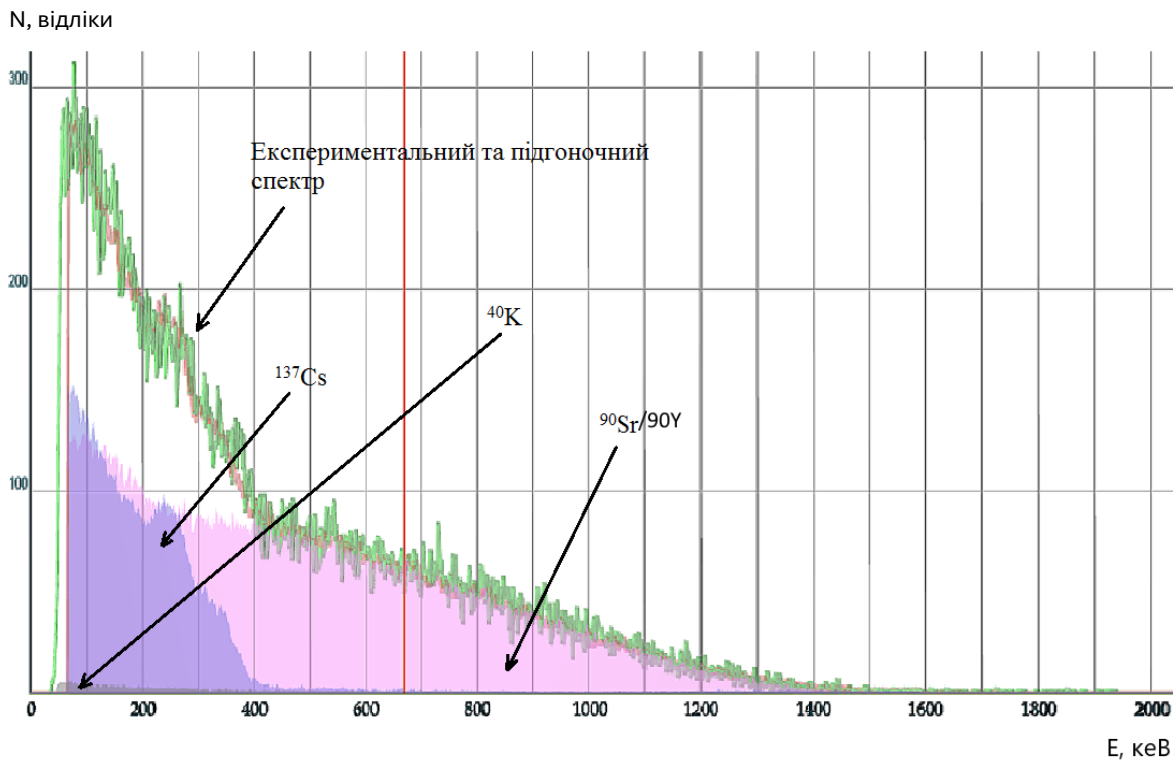


Рис. 2. Бета-спектр ґрунту та фантомів. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

і фону описуються кубічними сплайнами і надалі використовуються для опису експериментальних спектрів. Реалізація цього процесу відбувається таким чином.

У загальному випадку, при апроксимації експериментальних даних $\{y_i\}$, $1 \leq i \leq i_0$, за допомогою функції $f(i, X)$, де X – вектор підгоночних параметрів $\{X_j\}$, $0 \leq j \leq j_0$ (j_0 – кількість підгоночних параметрів), необхідно методом найменших квадратів мінімізувати функціонал ($S(X)$):

$$S(X) = \sum_{i=1}^{i_0} w_i [f(i, X) - y_i]^2, \quad (1)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, які зазвичай вибираються такими, що дорівнюють зворотному квадрату експериментальної похибки.

Для визначення мінімуму функціоналу похідні $\partial S / \partial X_j$ прирівнюються до нуля, і отримана система рівнянь розв'язується щодо шуканих параметрів X_j .

Отриманому розв'язку X_0 відповідає мінімальне значення функціоналу $S(X) = S_0$. Тут X_0 – набір параметрів, при якому досягається мінімум « χ^2 на ступінь свободи». Для визначення похибок параметрів для кожного з них по черзі знаходиться розв'язок рівняння $S(X_0 + \delta X_j, X_0) = S_0 + 1$

відносно δX_j , тобто визначається, при якому відхиленні j -го параметра від оптимальної величини (при фіксованих інших параметрах) значення функціоналу S збільшується на 1 порівняно з мінімальним. При цьому невизначеність параметрів буде дорівнювати:

$$\Delta X_j = \delta X_j \cdot R, \quad (2)$$

де R – параметр, що враховує якість підгонки, так зване « χ^2 на ступінь свободи».

Процедура обробки бета-спектрів представлена нижче.

Перш за все, з оброблюваного спектра і спектрів калібрувальних джерел, кожен з яких складається з i_0 каналів з числом відліків N_i в i -му каналі, $1 \leq i \leq i_0$, виміряних протягом живого часу t_j , віднімається спектр фону (з урахуванням живих часів). Індекс j відповідає: 0 – оброблюваному спектру, 1 – калібрувальному спектру ¹³⁷Cs, 2 – калібрувальному спектру ⁹⁰Sr, 3 – ⁴⁰K:

$$y_{j,i} = N_{j,i} - (t_j / t_{фон}) N_{фон,i}, \quad (3)$$

де $1 \leq i \leq i_0$, $0 \leq j \leq 3$, $t_{фон}$ – час набору фонового спектра, $N_{фон,i}$ – кількість відліків у i -му каналі фонового бета-спектра.

У результаті віднімання отримуємо «чисті» калібрувальні спектри ⁴⁰K, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, і спектр

аналізованого зразка. Останній містить невідомі активності ^{40}K , ^{90}Sr і ^{137}Cs .

Поправка вводиться у зв'язку з тим, що при досить тривалій роботі обладнання через зміни живлення фотоелектронного помножувача, підсилення спектрометра може зазнати незначного зміщення і калібрування по енергії в спектрах проб і калібрувальних спектрах може відрізнятись, тобто i -му каналу в калібрувальному спектрі буде відповідати енергія E_0 , а в оброблюваному спектрі – $(1+c)E_0$, де « c » – мала поправка. Для врахування цього ефекту калібрувальні спектри модифікуються таким чином. У відповідність i -му каналу оброблюваного спектра ставиться \hat{i} -й

канал калібрувальних спектрів, $\hat{i} = (I+c)i$. Очевидно, в загальному випадку \hat{i} не є цілим. Тому число відліків калібрувального спектра в \hat{i} -му каналі визначається методом лінійної інтерполяції:

$$y_i \approx y_{i_0} + (y_{i_{0+1}} - y_{i_0}) \cdot (\hat{i} - \hat{i}_0), \quad (4)$$

де \hat{i}_0 – ціла частина від \hat{i} , y_{i_0} – число відліків калібрувального спектра у \hat{i}_0 -му каналі, $y_{i_{0+1}}$ – число відліків калібрувального спектра у \hat{i}_{0+1} -му каналі.

При виділенні в оброблюваному спектрі області каналів від i_1 до i_2 функціонал набуває вигляду:

$$S(\mathbf{a}, \mathbf{b}, c) = \sum_{i=i_1}^{i_2} w_i \left[\sum_{j=1}^3 b_j \cdot (y_{j,i} + (y_{j,i+1} - y_{j,i}) \cdot c \cdot i) + \sum_{k=0}^2 a_k i^k - y_i \right]^2, \quad (5)$$

де $y_{j,i}$ – число відліків в оброблюваному спектрі для j -го калібрувального джерела у i -му каналі; $y_{j,i+1}$ – число відліків в оброблюваному спектрі для j -го калібрувального джерела у $i+1$ -му каналі.

У результаті його мінімізації визначаються параметри, які нас цікавлять b_j – відносні активності ^{137}Cs та ^{90}Sr . Для отримання абсолютної активності A потрібно помножити їх на активність калібрувальних джерел і врахувати співвідношення живих часів:

$$A_j = b_j \beta_j t_0 / t_j, \quad (6)$$

де β_j – активність відповідного фантома, t_j – живий час вимірювання відповідного калібрувального джерела, t_0 – живий час вимірювання досліджуваного джерела.

Щодо неживих об'єктів (грунт, рослинність), попередньо ретельно гомогенізованих, бета-спектрометрія ^{40}K , ^{90}Sr , ^{137}Cs можлива незалежно від розміру зразка. Але тут існує задача коректного обліку самопоглинання бета-електронів залежно від маси та щільності зразка. У лабораторних умовах це завдання вирішується вимірюванням гамма- і K_x -спектрів ^{137}Cs у зразку на гамма-спектрометрі з детектором з надчистого германію з берилієвим вікном. Завдяки великій різниці в енергіях (32 і 661 кеВ), процес самопоглинання електронів можна контролювати по самопоглинанню характеристичного випромінювання ^{137m}Ba .

Однак не в усіх лабораторіях є такі спектрометри, тим більше неможливо це робити в польових умовах. Тому при роботі в польових

умовах для оцінки самопоглинання електронів, було розроблено методи, засновані на вимірюванні зміщення піка конверсійних електронів від гамма-квантів з енергією 661 кеВ. Цей пік має, на відміну від електронів з радіоактивного розпаду, резонансну форму. Це значно підвищує чутливість до зміни положення піка конверсійних електронів залежно від щільності зразка. Середня енергія цих електронів $E = 630$ кеВ. Залежно від втрат на іонізацію відбувається зміщення цього піка за формулою [8]:

$$d / \rho = 0,407 E^{1,38}, \quad (7)$$

де d – пробіг електронів, г/см²; ρ – густина, г/см³; E – енергія електронів, МеВ.

Вимірявши енергію цих електронів у фантомі Cs , і порівнявши її з реальним станом у досліджуваному зразку, визначається поправка на самопоглинання в реальному зразку від фантома. Природно, що ця поправка буде різною для різних типів детекторів і матеріалу фантома. Тому бажано, щоб густини (ρ) фантома і реальних зразків не сильно відрізнялися, тобто для зразків рослин і тварин необхідно використовувати фантом зі щільністю, близькою до 1, а для проб ґрунту зі щільностями, близькими до густини досліджуваного типу ґрунтів. Проведені дослідження показали, що поправка на самопоглинання визначається за формулою:

$$\Delta A = 0,16(E_\phi - E) \cdot A, \quad (8)$$

де ΔA , %; A – активність ^{137}Cs ; E_ϕ – енергія конверсійного піка у фантомі, кеВ; E – енергія конверсійного піка в реальному спектрі, кеВ.

Було проведено верифікацію цього методу порівняно з радіохімічними вимірюваннями.

Порівняння результатів вимірювань ^{90}Sr у зразках ґрунту показало повне узгодження з середнім відхиленням близько 12 %, при зміні активності в зразках на чотири порядки (таблиця).

Питома активність ^{90}Sr у зразках ґрунту, визначена різними способами

Точка відбору та глибина, см	Питома активність, Бк/кг		$(A_{\text{рад}} - A_{\text{спектр}}) / A_{\text{спектр}}$
	Радіохімія ($A_{\text{рад}}$)	Спектрометрія ($A_{\text{спектр}}$)	
0 – 2	$9,50 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^6$	-0,06
2 – 4	$3,10 \cdot 10^5$	$3,88 \cdot 10^5$	-0,20
4 – 7	$1,10 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$	-0,26
7 – 10	$4,70 \cdot 10^4$	$4,75 \cdot 10^4$	-0,01
10 – 15	$3,00 \cdot 10^4$	$3,79 \cdot 10^4$	-0,21
15 – 20	$6,90 \cdot 10^3$	$7,02 \cdot 10^3$	-0,02
20 – 25	$7,50 \cdot 10^2$	$8,04 \cdot 10^2$	-0,07
25 – 30	$7,60 \cdot 10^2$	$8,36 \cdot 10^2$	-0,09
0 – 2	$1,80 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^6$	0,00
2 – 4	$4,20 \cdot 10^5$	$4,50 \cdot 10^5$	-0,07
4 – 7	$1,00 \cdot 10^5$	$1,33 \cdot 10^5$	-0,25
7 – 10	$2,60 \cdot 10^4$	$2,80 \cdot 10^4$	-0,07
10 – 15	$4,70 \cdot 10^3$	$4,96 \cdot 10^3$	-0,05
15 – 20	$3,10 \cdot 10^3$	$3,62 \cdot 10^3$	-0,14
20 – 25	$3,50 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^3$	0,03
25 – 30	$4,60 \cdot 10^3$	$3,84 \cdot 10^3$	0,20
0 – 2	$3,60 \cdot 10^6$	$3,83 \cdot 10^6$	-0,06
2 – 4	$2,00 \cdot 10^5$	$2,14 \cdot 10^5$	-0,07
4 – 7	$6,40 \cdot 10^4$	$5,84 \cdot 10^4$	0,10
7 – 10	$1,80 \cdot 10^4$	$1,85 \cdot 10^4$	-0,03
10 – 15	$6,80 \cdot 10^3$	$6,03 \cdot 10^3$	0,13
15 – 20	$1,50 \cdot 10^3$	$1,68 \cdot 10^3$	-0,11
20 – 25	$5,70 \cdot 10^2$	$4,73 \cdot 10^2$	0,21
25 – 30	$8,30 \cdot 10^2$	$6,16 \cdot 10^2$	0,35

Таким чином, спектроскопічний метод, заснований на вимірюванні спектрів електронів, враховує фізико-хімічний стан досліджуваних об'єктів і нестабільність роботи електронних систем у польових умовах. Це забезпечує підвищення точності вимірювань і надійність роботи спектрометрів. Цей метод дає змогу проводити дослідження концентрації ^{90}Sr і ^{137}Cs у різних об'єктах при зміні співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ від 1 до 100 з невизначеністю кращою за 20 %.

Однією з переваг неруйнівної спектроскопії ^{90}Sr є можливість прижиттєвих досліджень його поведінки в живих об'єктах. Тут вже немає проблем зі щільністю, але виникають методичні складнощі при врахуванні розміру досліджуваних об'єктів. Нами проведено дослідження на дрібних мишоподібних гризунах і птахів.

Порівняльний аналіз, виконаний на дрібних мишоподібних гризунах масою тіла від 14,1 до 45,1 г з питомою активністю ^{137}Cs від 0,7 до 393 Бк/г, показав, що результати бета-спектрометрії відрізняються від результатів радіохімії в середньому на 24 %, без систематичного відхилення (рис. 3). Зауважимо, що коефіцієнт кореляції дуже високий $R = 0,942$.

Аналогічне порівняння було проведено і для вибірки птахів масою від 10,2 до 23,2 г, які мають питому активність ^{137}Cs в тілі від 1,1 до 8,9 Бк/г. Послідовна оцінка загального вмісту ^{90}Sr , виконана методами бета-спектрометрії і радіохімії, показала, що між результатами двох методів тут теж існує хороша кореляція, $R = 0,925$ (рис. 4). Однак, на відміну від результатів, отриманих для мишоподібних гризунів, результати радіохімії ^{90}Sr у птахів виявилися систематично нижче результатів бета-спектрометрії, склавши лише 51 ± 5 %. Вочевидь, існуюча відмінність є наслідком впливу специфічного для птахів просторового розподілу в тілі стронційвмісних структур (кісток), що відрізняється від ссавців. Так, кістки кінцівок птахів становлять значно більшу частину від загальної маси скелета, ніж це має місце у мишоподібних гризунів. Крім того, якщо розглядати тварин як геометричне джерело у формі еліпсоїда, то у птахів кістки передніх кінцівок винесені до верхньої поверхні еліпсоїда, ближче до бета-детектора, і меншою мірою прикриті (екрановані) тканинами, ніж це має місце у гризунів. Це, безсумнівно, повинно

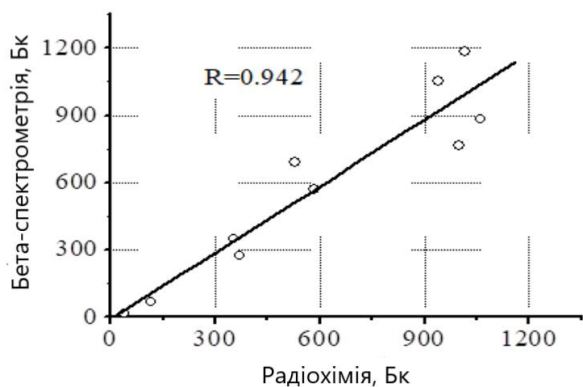


Рис. 3. Порівняння результатів визначення активності ⁹⁰Sr в мишах (n = 10), отриманих методом бета-спектрометрії і радіохімії, Бк на зразок.

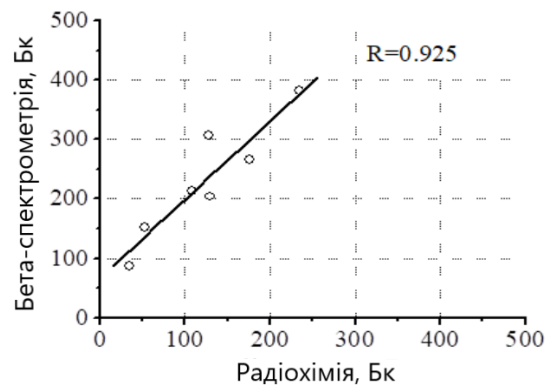


Рис. 4. Порівняння результатів бета-спектрометричного і радіохімічного визначення загального вмісту ⁹⁰Sr в тілі птахів (n = 7).

підвищувати ефективність реєстрації бета-частинок. Надалі, коефіцієнт, що відображає систематичне відхилення результатів бета-спектрометрії від радіохімії, було введено в розрахунки при оцінці вмісту ⁹⁰Sr у птахів на польовому бета-спектрометрі. Після його введення для даного набору зразків середнє відхилення результатів бета-спектрометрії від результатів радіохімії набуває несистематичний характер і становить близько 20 %.

Крім того, що тварини різних систематичних груп можуть мати різну топографію скелета, яка впливає на результати прижиттєвої бета-спектрометрії ⁹⁰Sr, у польових дослідженнях доводиться мати справу з особинами різного

розміру. Очевидно, що ступінь самопоглинання електронів ⁹⁰Y в тілі дрібних особин буде відрізнятися від такої у великих. Ретельні вимірювання зразків з відомим вмістом ⁹⁰Sr показали, що виліт бета-електронів і, відповідно, ймовірність їхньої реєстрації різко зростає зі зменшенням розмірів тіла (рис. 5). Для розрахунку активності ⁹⁰Sr у тварин різних розмірів необхідно вводити поправку k на масу тіла (m, г), виражену через параметри експоненціального рівняння:

$$k = 0,949 + 1,24e^{-\frac{m}{6,28}}$$

Для цього вихідну величину активності зразка ділили на коефіцієнт k.

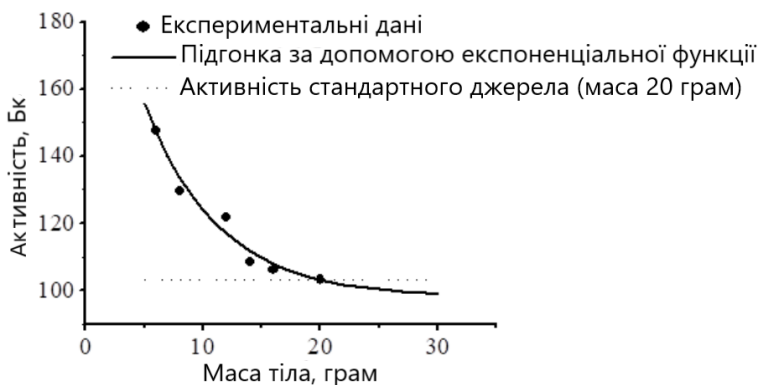


Рис. 5. Залежність результату оцінки активності ⁹⁰Sr від розмірів тіла (маси) тварини.

Таким чином, дані методики корекції активності ⁹⁰Sr задовільно працюють для тварин дрібних розмірів і при проведенні досліджень у польових умовах.

3. Висновки

Створений спектроскопічний метод, який ґрунтується на вимірюванні бета-спектрів та враховує як фізико-хімічний стан об'єктів дослідження, так і нестабільність роботи електроніки в польових умовах. Він дає змогу досліджувати активності ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr в різних об'єктах при зміні

співвідношення ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr від 1 до 100 з невизначеністю кращою за 20 %. Для перевірки даного методу проведено порівняння результатів визначення активності ⁹⁰Sr в мишах та птахів, отриманих даними та радіохімічними методами.

Розроблена методика врахування різної густини неживих об'єктів, яка базується на зміщенні положення піка конверсійних електронів ¹³⁷Cs. Проведено верифікацію даної методики порівняно з радіохімічними вимірюваннями ⁹⁰Sr в зразках ґрунту. За результатами перевірки обидві методики показали повне узгодження з радіохімічною

методикою в межах 10 - 15 %, при зміні активності в зразках на чотири порядки.

Отже, розроблені методики задовільно працюють для тварин дрібних розмірів при проведенні досліджень як в польових, так і в лабораторних умовах.

Робота виконана за фінансової підтримки бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230) на 2023 - 2024 рр. та гранту МАГАТЕ № 28137.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. В.А. Желтоножский, М.Д. Бондарьков. Радиохимия и спектроскопия радиостронция. Проблемы Чернобыльской зоны відчуження 20 (2019) 53. / V.A. Zheltonozhsky, M.D. Bondarkov. Radiochemistry and spectroscopy of radiostrontium. *Problems of Chernobyl Exclusion Zone* 20 (2019) 53. (Rus)
2. N. Vajda, C.-K. Kim. Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology. *Applied Radiation and Isotopes* 68(12) (2010) 2306.
3. C.W. Sill, D.S. Sill. Sample dissolution. *Radioact. Radiochem.* 6(2) (1995) 8.
4. F. Claisse. glass disks and solutions by fusion in borates for users of Claisse Fluxers. Publication by Corporation Scientific Claisse Inc., Sainte-Foy, Quebec, Canada (Doc. PUB951115) (1995).
5. D.M. Bondarkov et al. Non-Destructive methods of ^{90}Sr measurement. *Radiation & Applications* 3(1) (2018) 41.
6. M.D. Bondarkov, A.M. Maximenko, V.A. Zheltonozhsky. Non radiochemical technique for ^{90}Sr measurement. In: *The Radioecology-Ecotoxicology of Continental and Estuarine Environments. Proceedings of the International Congress (ECORAD 2001), France, Aix-en-Provence, Sept. 3 - 7, 2001 (Aix-en-Provence, Radioprotection-colloques, 2002) p. 927.*
7. R.B. Firestone et al. Table of Isotopes. 8th edition (New York, Wiley Interscience, 1996).
8. К. Зигбан. *Альфа-, бета- и гамма-спектрометрия*. Пер. с англ. Под ред. К. Зигбана. Вып. 1 (Москва: Атомиздат, 1968) с. 42. / K. Siegbahn. *Alpha-, Beta- and Gamma-Spectrometry*. Transl. from English. K. Siegbahn (Ed.). Vol. 1 (Moskva: Atomizdat, 1968) p. 42. (Rus)

**M. D. Bondarkov¹, V. O. Zheltonozhsky², D. E. Myznikov²,
A. M. Savrasov^{2,*}, V. I. Slisenko², M. V. Strilchuk²**

¹ State Scientific and Research Institution

“Chernobyl Centre for Nuclear Safety, Radioactive Waste, and Radioecology”, Slavutych, Ukraine

² Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: asavrasov@kinr.kiev.ua

 ^{90}Sr SPECTROMETRY

A spectroscopic method has been developed based on measuring of beta-spectra, which takes into account the physico-chemical state of the investigated objects and the instability of electronic systems in field conditions. This method allows for the investigation of the ^{90}Sr and ^{137}Cs concentration in various objects with a change in the $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratio from 1 to 100 with an error of better than 20 %. A methodology has been developed that takes into account the change in the density of the inanimate objects and is based on shifting of the peak position of the conversion electrons from the ^{137}Cs decay. The verification of the methodology compared to radiochemical measurements of ^{90}Sr in soil samples showed complete agreement within 10 - 15 %, with a change of the activity in the samples by four orders of magnitude.

Keywords: beta-spectrometry, methods of ^{90}Sr registration, ^{40}K , ^{90}Sr , and ^{137}Cs calibration sources, radiochemical methods.

Надійшла / Received 15.03.2024