

Сінченко В.Г.¹, Омельченко Н.М.²

¹ДП «Інститут екогігієни і токсикології ім.Л.І.Медведя» МОЗ України,
відділ медико-екологічних проблем, м. Чернівці

²НТУ «Харківський політехнічний інститут», Чернівецький факультет

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ РАДІОНУКЛІДІВ Cs- 137 ТА Sr-90 У ПИТНІЙ ВОДІ ПРИРОДНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЇХ ВМІСТУ АДСОРБЦІЙНО- СПЕКТРОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Ключові слова: питна вода; радіонукліди ^{137}Cs і ^{90}Sr ; спектрометрія; показники
радіаційної безпеки; моніторинг

Вступ. Наявне забруднення частини території України радіонуклідами (РН) з тривалим періодом напіврозпаду, зумовлене їх антропогенним походженням, зокрема аварією на ЧАЕС [1], дає підґрунтя для їх надходження у поверхневі водоносні горизонти і далі в джерела господарського та питного водопостачання. Міграції РН з поверхні сприяють вітровий перенос пилового аерозолю і осідання його на ґрунтово-рослинні і водні поверхні, культивування сільськогосподарських угідь, водна міграція, ландшафтно-геохімічні особливості територій [2]. Особливу небезпеку становлять РН ^{137}Cs та ^{90}Sr , які через високу хімічну активність та розчинність легко вбудовуються в біологічні цикли природних біоекосистем [3] та організму людини [4]. Тому проведення досліджень по вивченю вмісту РН ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді джерел питного водопостачання видається актуальним і необхідним як з позиції наукового вивчення процесів міграції РН у природних екосистемах так і з позиції прикладної радіології – безпеки споживання води для організму людини, особливо у зонах радіоактивного забруднення [5]. Вимоги на здійснення таких досліджень в останньому випадку та науково обґрунтовані гігієнічні регламенти наведено в [6, 7].

Вихідні передумови. Дослідження забрудненості води природних джерел водопостачання ^{137}Cs та ^{90}Sr можна проводити як методом класичного радіохімічного аналізу [8], так і методами гама- та бета-спектрометрії [9]. В першому випадку проводиться виділення цих РН з наступними вимірюваннями їх активності гама- та бета-радіометром. Аналіз потребує проведення великої кількості хімічних операцій, різноманітних хімічних реактивів, значного часу на його виконання. Початковий об'єм проби води для досліджень становить 20-60 дм³.

Більш зручний у застосуванні для проведення відповідних досліджень наявності ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді є метод їх адсорбції у вигляді катіонів на іонообмінних смолах з наступним вимірюванням активності ^{137}Cs та ^{90}Sr за допомогою бета-спектрометра. Метод рекомендовано застосовувати при дослідженнях поверхневих, ґрутових та стічних вод довкілля. Методики

виконання вимірювань (МВВ) та вимоги до лічильних зразків у таких дослідженнях з використанням спектрометричного комплексу «Прогрес» наведено в [10], а з спектрометрами серії СЕБ-01-XXX – в [11]. Початковий об'єм проби води в методі адсорбції катіонів становить 5-10 дм³, що зумовлено обмеженою ємністю катіоніту і що суттєво менше в порівнянні з методом радіохімічного аналізу. В той же час, для поширення застосування методу адсорбції катіонів та МВВ на дослідження вмісту РН ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr у водах, склад яких містить більшу кількість катіонів різних хімічних елементів, слід визначити можливості зменшення початкового об'єму (V_p) води, яка досліджується на вміст цих РН.

Мета та завдання. Даною роботою присвячена уточненню методичних підходів до проведення методом адсорбції катіонів досліджень вмісту ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у питній воді як з позиції визначеності питомої активності цих РН, так і застосування одержаних результатів для розрахунку показників радіаційної безпеки [6]. Застосовується комплексний підхід, який пов'язує всі етапи досліджень: від способу підготовки лічильного зразка до вимірювань вмісту РН та до розрахунку показника придатності в критерії радіаційної безпеки. Аналіз проводиться з врахуванням метрологічних характеристик бета-спектрометра. Завдання роботи – встановлення характеристик МВВ, таких як нижня межа вимірювання питомої активності ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr, а також знаходження верхніх меж активності цих РН, значення яких задовільняють критерій безпечного вмісту ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr у питній воді. При цьому розглядаються випадки різних величин об'єму V_p води. Проведені уточнення сприяють підвищенню точності і достовірності одержуваних результатів при встановленні якості питної води.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо взаємозв'язок, який встановлює критерій радіаційної безпеки питної води між величинами питомої активності РН ¹³⁷Cs – A_{Cs} та ⁹⁰Sr – A_{Sr} , величиною допустимих рівнів U_{Cs} , U_{Sr} цих РН та величиною мінімально вимірюваної питомої активності (МВПА) для ¹³⁷Cs – ^{MB} A_{Cs} та ⁹⁰Sr – ^{MB} A_{Sr} [6]. У випадку наявності у питній воді РН ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr цей зв'язок визначається формулою:

$$A_{Cs} + A_{Sr} + 0,6 \cdot [0,44 \cdot (A_{Cs}^2 + A_{Sr}^2)^{0,5}] \leq 2. \quad (1)$$

У співвідношенні (1) враховано, що для питної води встановлені значення $U_{Cs}=U_{Sr}=2$ Бк/дм³. В ньому також припускається, що величина максимальної допустимої основної похибки вимірювання питомої активності δ МВВ для обох РН не перевищує 0,4 при довірчій імовірності Р=0,95.

У випадку відсутності у питній воді одного з РН, наприклад, ¹³⁷Cs, або коли виміряна величина його питомої активності менша за ^{MB} A_{Cs} , критерій безпечного вмісту ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr встановлюється як:

$$1,2 \cdot {}^{MB}A_{Cs} + A_{Sr} + 0,6 \cdot [0,44 \cdot ({}^{MB}A_{Cs}^2 + A_{Sr}^2)^{0,5}] \leq 2. \quad (2)$$

При наявності у питній воді ¹³⁷Cs та відсутності в ній ⁹⁰Sr, або коли виміряна величина питомої активності ⁹⁰Sr менша за його ^{MB} A_{Sr} ,

співвідношення (2) трансформується. Функціональний зв'язок між активностями РН залишається аналогічним (2), однак індекси «Cs» і «Sr» міняються місцями.

Коли вимірювані значення питомої активності обох РН менші за відповідні їм МВПА, визначені в процесі вимірювань, придатність питної води до споживання визначаються з критерію радіаційної безпеки за формулою:

$$1,2 \cdot {}^{MB}A_{Cs} + 1,2 \cdot {}^{MB}A_{Sr} + 0,6 \cdot [0,44 \cdot ({}^{MB}A_{Cs}^2 + {}^{MB}A_{Sr}^2)^{0,5}] \leq 2. \quad (3)$$

Співвідношення (2)–(3), як і (1), відповідають значенню похибки $\delta=0,4$ при довірчій ймовірності при вимірюваннях питомої активності $P=0,95$. Також при розрахунках має виконуватись умова обмеження 40% відносної похибки визначення показника відповідності, яку для співвідношень (1)–(3) можна записати як:

$$\begin{aligned} [0,44 \cdot ({}^{MB}A_{Cs}^2 + {}^{MB}A_{Sr}^2)^{0,5}] &\leq 0,8; \\ [0,44 \cdot ({}^{MB}A_{Cs}^2 + {}^{MB}A_{Sr}^2)^{0,5}] &\leq 0,8; \\ [0,44 \cdot ({}^{MB}A_{Cs}^2 + {}^{MB}A_{Sr}^2)^{0,5}] &\leq 0,8. \end{aligned} \quad (4)$$

Співвідношення (1)–(3) дозволяють розрахувати величину значень верхньої межі вимірювань питомої активності РН ${}^{137}Cs - {}^B A_{Cs}$ та РН ${}^{90}Sr - {}^B A_{Sr}$ якщо відомі величини A_{Cs} , A_{Sr} та ${}^{MB}A_{Cs}$ і ${}^{MB}A_{Sr}$ цих РН. Величини ${}^B A_{Cs}$ та ${}^B A_{Sr}$ визначаються з (1)–(3) при умові переходу нерівності в рівність. Нижні межі вимірювання активності РН ${}^{137}Cs - {}^H A_{Cs}$ та ${}^{90}Sr - {}^H A_{Sr}$ встановлюються як межі, починаючи з яких питома активність РН при заданій довірчій імовірності P гарантовано визначається з похибкою, яка не перевищує встановленого значення. Величини ${}^H A_{Cs}$ та ${}^H A_{Sr}$ визначаються через їх зв'язок з мінімально вимірюваною питомою активністю спектрометра МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr}. Цей зв'язок для ${}^{137}Cs$ та ${}^{90}Sr$ можна записати як:

$${}^H A_{Cs} = 2 \cdot {}^{MB}A_{Cs} = 2 \cdot k_k \cdot MBPA_{Cs}; \quad {}^H A_{Sr} = 2 \cdot {}^{MB}A_{Sr} = 2 \cdot k_k \cdot MBPA_{Sr}, \quad (5)$$

де k_k – коефіцієнт концентрування проби води по об'єму. Коефіцієнт 2 вводиться для компенсації недосконалості теорії розрахунку величин ${}^{MB}A_{Cs}$ та ${}^{MB}A_{Sr}$.

Розглянемо результати розрахунку величин ${}^H A_{Cs}$, ${}^H A_{Sr}$ та ${}^B A_{Cs}$, ${}^B A_{Sr}$ у випадку, коли МВПА_{Cs} і МВПА_{Sr} відповідають максимально допустимим, згідно з МВВ [11], значеннями в 200 Бк/дм³ та 60 Бк/дм³ відповідно. Дійсно, згідно цієї МВВ, рекомендованої для визначення вмісту РН ${}^{137}Cs$ та ${}^{90}Sr$ у питній воді [12], питома активність ${}^{90}Sr$ у воді визначається по питомій активності ${}^{90}Y$ і тому можна прийняти МВПА_{Sr} = МВПА_Y = 60 Бк/дм³. Також зробимо розрахунок для випадку МВПА_{Cs} = 50 Бк/дм³ та МВПА_{Sr} = 25 Бк/дм³, який відповідає значенням метрологічних характеристик спектрометра типу СЕБ-01-XXX, наведеним в [13]. При розрахунках значення величин k_k вибрано 0,002, що відповідає початковому об'єму проби води $V_p = 5,0$ дм³. Розрахунок здійснено з використанням співвідношень (2) та (5). В таблиці 1 наведено одержані результати.

Таблиця 1. Розрахункові значення питомих активностей ${}^hA_{Cs}$, ${}^hA_{Sr}$ та ${}^bA_{Cs}$, ${}^bA_{Sr}$ в Bk/dm^3 для $V_n=5,0 dm^3$ при різних МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr}

МВПА _{Cs} =50 Bk/dm^3 , МВПА _{Sr} =25 Bk/dm^3				МВПА _{Cs} =200 Bk/dm^3 , МВПА _{Sr} =60 Bk/dm^3			
${}^hA_{Cs}$	${}^bA_{Cs}$	${}^hA_{Sr}$	${}^bA_{Sr}$	${}^hA_{Cs}$	${}^bA_{Cs}$	${}^hA_{Sr}$	${}^bA_{Sr}$
0,20	1,663	0,10	1,487	0,80	1,467	0,24	1,166

Зазначимо, що співвідношення (2) вибрано для розрахунків як орієнтовне. Воно відповідає випадку, який частіше за інші, має спостерігатись в реальних умовах. Дійсно, за результатами моніторингових досліджень вмісту РН ^{137}Cs та ^{90}Sr у поверхневих шарах ґрунту, наявна питома активність ^{137}Cs суттєво перевищує питому активність ^{90}Sr [14]. Можна припустити, що при міграції РН з поверхні до джерел водопостачання співвідношення між активностями РН ^{137}Cs та ^{90}Sr суттєво не змінюється. Тому результати розрахунків та висновків з них носять загальний характер. Точніші кількісні значення величин ${}^bA_{Cs}$ та ${}^bA_{Sr}$ при іншому співвідношенні між активностями РН можна встановити аналогічно, зробивши розрахунки за співвідношеннями (1) та (3).

Перейдемо до розгляду результатів розрахунку. З табл. 1 видно, що зменшення МВПА_{Cs} з 200 до 50 Bk/dm^3 та МВПА_{Sr} з 60 до 25 Bk/dm^3 призводить до зменшення величин ${}^hA_{Cs}$ з 0,80 до 0,20 Bk/dm^3 , а ${}^hA_{Sr}$ з 0,24 до 0,10 Bk/dm^3 . Це обумовлює можливість збільшення величини ${}^hA_{Cs}$ та ${}^hA_{Sr}$ для спектрометра з МВПА_{Cs}=50 Bk/dm^3 та МВПА_{Sr}=25 Bk/dm^3 за рахунок збільшення значення коефіцієнту k_k , тобто зменшення величини V_n . Наприклад, для $V_n=2,0 dm^3$ величина ${}^hA_{Cs}$ становить 0,50 Bk/dm^3 , а ${}^hA_{Sr}$ =0,25 Bk/dm^3 , що відповідає вимогам МВВ. Розгляд змін значень величин ${}^bA_{Cs}$ та ${}^bA_{Sr}$ наступний. Так, ${}^bA_{Cs}$ зростає з 1,467 до 1,663 Bk/dm^3 , а ${}^bA_{Sr}$ з 1,116 до 1,487 Bk/dm^3 . Для випадку спектрометра з МВПА_{Cs}=50 Bk/dm^3 та МВПА_{Sr}=25 Bk/dm^3 зменшення об'єму V_n до 2,0 dm^3 , як показує розрахунок, призводить до зменшення значень ${}^bA_{Cs}$ та ${}^bA_{Sr}$ до 1,463 Bk/dm^3 і 1,340 Bk/dm^3 відповідно в порівнянні з випадком $V_n = 5,0 dm^3$. Ці значення не перевищують розрахованих за вимогами МВВ. Таким чином, можна реалізувати шлях зменшення об'єму V_n у випадку реального спектрометра, коли його метрологічні характеристики, МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr} які визначені в результаті метрологічної атестації, є меншими за встановлені вимогами МВВ.

Такий підхід використано при встановленні діапазону варіацій значень питомої активності РН у випадку реального бета-спектрометра СЕБ-01-150 з МВПА_{Cs} = 110 Bk/dm^3 та МВПА_{Sr} = 60 Bk/dm^3 . Результати розрахунків для різних величин V_n наведено в табл. 2. Величини V_n вибрані з урахуванням специфіки програмного забезпечення спектрометра, згідно якого коефіцієнт k_k змінюється з кроком 0,001.

Таблиця 2. Значення ${}^hA_{Cs}$, ${}^bA_{Cs}$ та ${}^hA_{Sr}$, ${}^bA_{Sr}$ при різних початкових об'ємах V_n

V_n, dm^3	k_k	${}^hA_{Cs}, Bk/dm^3$	${}^bA_{Cs}, Bk/dm^3$	${}^hA_{Sr}, Bk/dm^3$	${}^bA_{Sr}, Bk/dm^3$
2,00	0,005	1,10	1,209	0,60	1,031
2,50	0,004	0,88	1,358	0,48	1,148
3,33	0,003	0,66	1,409	0,36	1,260
5,00	0,002	0,44	1,467	0,24	1,370
10,00	0,001	0,22	1,525	0,12	1,477

Співставимо наведені в табл. 1 та 2 дані розрахунків для випадку двох спектрометрів. Метрологічні характеристики МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr} першого з них відповідають максимальним допустимим згідно МВВ, другого – характеристикам реального спектрометра. Для спрошення запису при аналізі даних опустимо далі у величинах активності розмірність Бк/дм³. Як видно з порівняння розрахованих даних, для V_п=5,0 дм³ значення ^вA_{Cs} та ^вA_{Sr} є тотожними. Величини ^вA_{Cs} і ^вA_{Sr} для спектрометра 2 є меншими та більшими за відповідні їм величини для спектрометра 1. При зменшенні об'єму до V_п=3,33 дм³ величина ^вA_{Cs} спектрометра 2 лише на 0,06 менша за визначену для спектрометра 1. Величини ^вA_{Cs}=0,66 та ^вA_{Sr}=1,260 відповідно менші та більші за розраховані 0,80 та 1,166. В той же час, величина ^вA_{Sr} збільшується з 0,24 до 0,36. При подальшому зменшенні об'єму V_п до 2,5 дм³ величини ^вA_{Cs} і ^вA_{Sr} спектрометра 2 перевищують, а ^вA_{Cs} і ^вA_{Sr} мають менші значення ніж відповідні їм значення для спектрометра 1. Це призводить до зменшення діапазону вимірюваних значень активності РН ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr, які будуть задовольняти критерій радіаційної безпеки. Таким чином, із співставлення даних розрахунків, враховуючи очікування перевищення вмісту ¹³⁷Cs у воді природних джерел над РН ⁹⁰Sr, у випадку спектрометра 2 можна практично без втрат по чутливості та діапазону допустимих значень активності РН ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr зменшити початкові об'єми V_п з 5,0 дм³ до 3,33 дм³. Зменшення об'єму V_п до 2,5 дм³ не є доцільним. Його можна вважати прийнятним тільки тоді, коли МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr} реального спектрометра будуть становити значення приблизно 100 та 40 Бк/дм³ відповідно.

Визначені на основі розрахунку та наведені в табл. 2 величини ^вA_{Cs} та ^вA_{Sr} можуть бути встановлені експериментально. Для цього, шляхом розведення, слід виготовити ряд модельних розчинів РН у воді та провести вимірювання їх питомої активності. В результататах вимірювання слід фіксувати як середні значення питомої активності РН A_{Cs} та A_{Sr}, так і похибку їх вимірювання – δ_{Cs} та δ_{Sr}. Всі зазначені величини входять до протоколу, який надається за результатами обрахунку спектрів програмним забезпеченням спектрометра. За результатами таких вимірювань слід визначити залежності A_{Cs} і A_{Sr} та δ_{Cs} і δ_{Sr} від відомої величини відносної концентрації С. На основі цієї залежності для заданої величини δ_{Cs} та δ_{Sr}, наприклад максимально допустимого значення δ_{Cs} = δ_{Sr} = 0,4, визначаються величини активності РН, які відповідають ^вA_{Cs} та ^вA_{Sr}.

В процесі вимірювання активностей обрахунок сумарного спектру РН згідно МВВ [11] здійснюється програмним забезпеченням спектрометра, в якому визначається питома активність як ⁹⁰Sr так і ⁹⁰Y. З фізичних причин, точність вимірювання активності ⁹⁰Y значно вища за точність вимірювання активності ⁹⁰Sr. Підтвердженням є наведена на рис.1А копія фрагменту протоколу, який одержано за результатами визначення питомої активності РН у воді.

Коэффициент озоления/множитель 3.00E-03 (Сырой вес 3.33E+00 зола 1.00E-02)					
Нуклид	Акт.	Бк/кг	Ки/кг	Вклад(%)	отн.погр.(%,0.95)
1 SR_90		2.67E+00	7.22E-11	32.9	44.9
2 K_40		3.37E+00	9.11E-11	41.5	15.3
3 Y_90		2.07E+00	5.60E-11	25.5	14.0
Сумма		8.12E+00	2.19E-10	ИНТЕНСИВНОСТЬ	4.7 имп/сек
МИК(конц) (отн.погр= 40%, p=0.95) :					
1 SR_90		1.14E+00	3.07E-11		
2 Y_90		1.81E-01	4.88E-12		
3 K_40		2.42E-01	6.54E-12		
4 CS_137		4.28E-01	1.16E-11		

Коэффициент озоления/множитель 3.00E-03 (Сырой вес 3.33E+00 зола 1.00E-02)					
Нуклид	Акт.	Бк/кг	Ки/кг	Вклад(%)	отн.погр.(%,0.95)
1 SR_90		2.12E+00	5.72E-11	37.0	14.4
2 K_40		3.28E+00	8.88E-11	57.4	16.6
3 CS_137		3.23E-01	8.72E-12	5.6	165.4
Сумма		5.72E+00	1.55E-10	ИНТЕНСИВНОСТЬ	4.7 имп/сек
МИК(конц) (отн.погр= 40%, p=0.95) :					
1 K_40		2.42E-01	6.54E-12		
2 SR_90		1.76E-01	4.75E-12		
3 CS_137		4.28E-01	1.16E-11		

Рис. 1. Фрагмент протоколу досліджень РН ^{90}Sr у воді при визначенні активності ^{90}Sr по активності РН ^{90}Y (А) та по сумі активності РН ^{90}Sr і ^{90}Y (Б).

Тому кінцевий результат вимірювання встановлюється за відомою формулою, яка відповідає зв'язку активності ^{90}Sr з вимірюваною активністю ^{90}Y , значенням сталої його розпаду, інтервалом часу від моменту підготовки лічильного зразка до початку вимірювання. Такий спосіб дозволяє визначити активність ^{90}Sr у відсутності радіоактивної рівноваги між ^{90}Sr та ^{90}Y та встановити дійсне значення питомої активності ^{90}Sr шляхом корекції результатів вимірювання активності ^{90}Y . Однак, при виграші в часі, такий спосіб аналізу зменшує точність визначення питомої активності РН ^{90}Sr . Із збільшенням інтервалу часу до досягнення стану рівноваги між РН точність вимірювання досягає максимального значення. Тому, при вимірюваннях питомої активності ^{90}Sr у воді, коли значення активності знаходяться поблизу межі чутливості спектрометра, перевагу доцільно надавати вимірюванням, які здійснюються за умови радіоактивної рівноваги РН ^{90}Sr та ^{90}Y .

При виконанні умови рівноваги для розрахунку активності ^{90}Sr можна використовувати програмне забезпечення, за яким його активність визначається за сумою спектрів ^{90}Sr та ^{90}Y . Такий спосіб реалізовано в ряді програмних продуктів для спектрометричних вимірювань. Його широко застосовують при спектрометричних дослідженнях вмісту РН ^{137}Cs та ^{90}Sr в харчових продуктах та пов'язаних з цим МВВ [15,16]. На рис. 1Б наведено результати визначення питомої активності ^{90}Sr за таким способом обрахунку спектрів. Протоколи, одержані як результат вимірювання активності лічильного зразка, який підготовлено з розчину солі ^{90}Sr в дистильованій воді об'ємом 3,33 дм³. Спектри випромінювання РН обраховувались за допомогою програмного забезпечення АК-1.

Порівняльний аналіз вимірюваних значень питомої активності РН, наведених на рис. 1, показує їх практичне співпадання у випадку А (коли активність РН ^{90}Sr дорівнює активності ^{90}Y) та Б. Аналогічний висновок можна зробити і з результатів вимірювання активності радіоактивного ^{40}K , наявність якого у воді служить кількісним маркером процесу адсорбції катіонів. Порівняння значень величин МВПА (МИК) з протоколів для різних РН також підтверджує тезу про тотожність результатів обрахунку спектру у випадку А і Б. Таким чином, при визначенні вмісту РН ^{137}Cs та ^{90}Sr у питній воді первинну хімічну підготовку води для одержання лічильного зразка необхідно здійснити за МВВ [11], а процес визначення їх активності та похибок вимірювання може бути здійснено за будь-якою атестованою програмою обрахунку спектрів. В той же час слід враховувати величину відносної похибки, з якою при атестації встановлено величини МВПА_{Cs} та МВПА_{Sr} спектрометра.

Наведений вище спосіб експериментального визначення значень нижньої межі вимірювань реалізовано на модельних розчинах РН ^{90}Sr у випадку реального спектрометра СЕБ-01-150. Вимірювання проводились після досягнення рівноваги між РН ^{90}Sr та ^{90}Y . Сіль радіоактивного ^{137}Cs в модельні розчини не вносила. Обробка спектрів здійснювалась програмним забезпеченням AKWin-6.0. На рис.2 подано результати вимірювань середніх значень питомої активності A_{Sr} та відносних похибок її вимірювання δ_{Sr} при різних відносних концентраціях С в розчині РН ^{90}Sr .

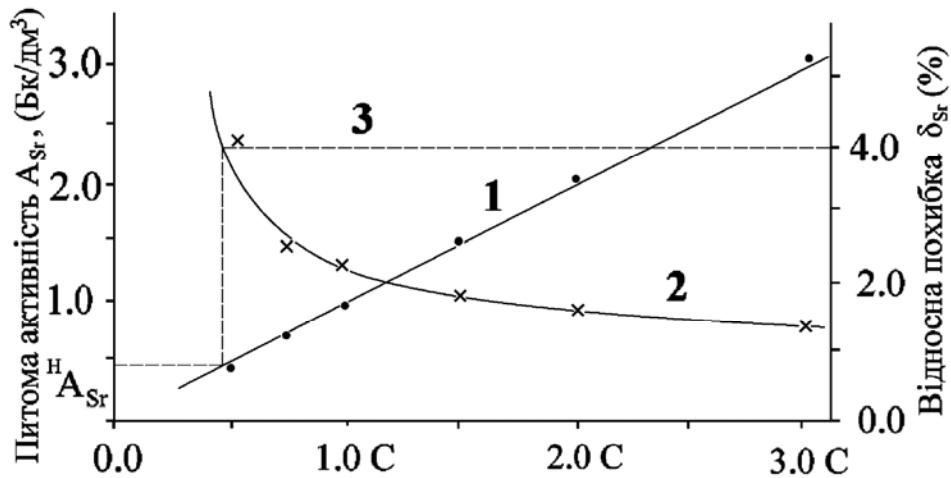


Рис.2. Залежність середніх значень питомої активності A_{Sr} (1) та відносної похибки δ_{Sr} (2) для різних відносних концентрацій С у воді РН ^{90}Sr .

Як видно з рис.2, спостерігається лінійна залежність величини середнього значення питомої активності A_{Sr} від величини концентрації С (пряма 1). З її зменшенням величина A_{Sr} також зменшується. В той же час, росте величина δ_{Sr} (крива 2). Достатньо різке її збільшення спостерігається при $C \leq 0,75$. Для величини $\delta_{\text{Sr}}=0,4$ значення С складає 0,45, що відповідає активності ${}^{\text{H}}A_{\text{Sr}}$ в 0,44 Бк/дм³ (крива 3). Зазначимо, що встановлення через значення С величини ${}^{\text{H}}A_{\text{Sr}}$ видаються більш точним ніж ті, які можна встановити з графічної побудови залежності $\delta_{\text{Sr}} = f(A_{\text{Sr}})$. В цьому випадку при визначенні ${}^{\text{H}}A_{\text{Sr}}$ використовується та одночасно перевіряється гіпотеза лінійності відгуку

бета-спектрометра на вхідну активність РН, що при невідомому функціональному зв'язку між δ_{Sr} та A_{Sr} забезпечує більш точний результат.

Таким чином, в порівнянні з розрахунковою величиною ${}^h A_{\text{Sr}}$ для $V_{\text{п}}=3,33 \text{ дм}^3$, значення якої наведено в табл.2, експериментально встановлена величина ${}^h A_{\text{Sr}}$ є більшою на $0,08 \text{ Бк}/\text{дм}^3$. Однією з імовірних причин розбіжності в результатах може бути неточність вимірювань малого об'єму на етапі розділення розчину солі ${}^{90}\text{Sr}$. Менш імовірним є вплив зовнішніх факторів на етапі вимірювання, коли їх дія призводить до коливань значень вимірюваної питомої активності. Одержаній результат по встановленню межі ${}^h A_{\text{Sr}}$ можна вважати задовільним, бо з урахуванням величини похиби вимірювання він відповідає встановленому методом розрахунку.

Використовуючи експериментальні дані про ${}^h A_{\text{Cs}}$ і ${}^h A_{\text{Sr}}$ можна оцінити точність розрахунку значень ${}^{\text{MB}} A_{\text{Cs}}$ і ${}^{\text{MB}} A_{\text{Sr}}$. Використовуючи їх у формулах (2) або (3) замість величин ${}^h A_{\text{Cs}}$ і ${}^h A_{\text{Sr}}$, можна знайти величини ${}^{\text{B}} A_{\text{Cs}}$ і ${}^{\text{B}} A_{\text{Sr}}$ для реального спектрометра. Таким чином, буде встановлено реальний діапазон питомих активностей РН ${}^{137}\text{Cs}$ та ${}^{90}\text{Sr}$, в межах якого буде виконуватись критерій радіаційної безпеки щодо наявності у питній воді ${}^{137}\text{Cs}$ та ${}^{90}\text{Sr}$.

Розглянемо показники радіаційної безпеки, встановлені на основі результатів вимірювання вмісту РН ${}^{137}\text{Cs}$ та ${}^{90}\text{Sr}$ у воді р. Прут, яка є джерелом господарського та питного водопостачання центральної частини м. Чернівці. Зразки проб води відібрані у зимовий період року. Концентрація основних катіонів у воді в $\text{мг}/\text{дм}^3$ становила: $K^+ = 3,5$; $Na^+ = 20,0$; $Ca^{2+} = 76,5$; $Mg^{2+} = 19,5$. Вага сухого залишку – $320 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Концентрація катіонів визначалася методом атомно-адсорбційної спектрометрії. Вимірювання активності РН ${}^{137}\text{Cs}$ та ${}^{90}\text{Sr}$ виконано вищевказаним спектрометром СЕБ-01-150 з програмою обрахунку AKWin 6.0, на лічильних зразках, які одержані при $V_{\text{п}}=2,0 \text{ дм}^3$, $V_{\text{п}}=2,5 \text{ дм}^3$, $V_{\text{п}}=3,33 \text{ дм}^3$ та $V_{\text{п}}=5,0 \text{ дм}^3$. Величини ${}^{\text{MB}} A_{\text{Cs}}$ і ${}^{\text{MB}} A_{\text{Sr}}$ встановлені за час вимірювання 7200 с. Результати вимірювань величин ${}^{\text{MB}} A_{\text{Cs}}$ та ${}^{\text{MB}} A_{\text{Sr}}$ перераховані на величину відносної похиби 40% за алгоритмом, наведеним в [17]. За отриманими результатами вимірювань розраховані величини показника відповідності В, похиби його вимірювання ΔV та показника придатності П [15]. Результати розрахунків зведені в табл.3.

Таблиця 3. Значення величин ${}^{\text{MB}} A_{\text{Cs}}$ і ${}^{\text{MB}} A_{\text{Sr}}$ в $\text{Бк}/\text{дм}^3$ та В, ΔV і П при різних об'ємах $V_{\text{п}}$ для води р. Прут

$V_{\text{п}}, \text{дм}^3$	${}^{\text{MB}} A_{\text{Cs}}$	${}^{\text{MB}} A_{\text{Sr}}$	В	ΔV	П
2,00	0,860	0,423	0,770	0,210	0,896
2,50	0,688	0,337	0,615	0,166	0,714
3,33	0,516	0,254	0,462	0,127	0,538
5,00	0,344	0,169	0,308	0,0843	0,357

З табл.3 видно, що зменшення при дослідженнях об'єму $V_{\text{п}}$ призводить до збільшення показника придатності П води до споживання. Так, при зменшенні $V_{\text{п}}$ з $5,0 \text{ дм}^3$ до $3,33 \text{ дм}^3$ показник П збільшується з 0,357 до 0,538. Подальше зменшення об'єму $V_{\text{п}}$ до $2,5 \text{ дм}^3$ та $2,0 \text{ дм}^3$ збільшує значення П до 0,714 та 0,896 відповідно. Значення величини П відповідають зворотно-

пропорційній залежності від величини $V_{\text{п}}$. Також для всіх досліджених об'ємів $V_{\text{п}}$ виконується критерій придатності води до споживання $\Pi \leq 1$. Таким чином, при моніторингових дослідженнях води р. Прут в зимовий період на вміст РН ^{137}Cs та ^{90}Sr на спектрометрі типу СЕБ-01-XXX з метрологічними характеристиками МВПА_{Cs}=110 Бк/дм³ та МВПА_{Sr}=60 Бк/дм³ або меншими та з використанням методу адсорбції катіонів об'єм проби води для досліджень може становити від 2,0 дм³ до 5,0 дм³. Отже, експериментальні результати показали, що обґрунтovаний вище розрахунками об'єм $V_{\text{п}}=3,33$ дм³ є цілком прийнятним при дослідженнях як з позиції мінімальної достатності, так і з позиції забезпечення встановлених МВВ вимог до точності та достовірності одержуваних результатів. Подальше зменшення об'єму $V_{\text{п}}$ виправдане лише за умови відсутності у воді природних РН ^{226}Ra та ^{232}Th , що в більшості випадків не спостерігається. Наявність у воді цих РН ускладнює процес визначення вмісту РН ^{137}Cs та ^{90}Sr [18], збільшує імовірність висновку про неможливість використання води в цілях питного водопостачання. В цьому разі слід застосовувати додаткові методи аналізу радіаційної якості води, зокрема гама-спектрометричні.

Висновки.

1. Запропонований в роботі комплексний підхід, який визначає взаємозв'язок експериментально вимірюваних спектрометричним методом питомих активностей РН ^{137}Cs і ^{90}Sr з метрологічними характеристиками спектрометра, показниками відповідності та придатності до використання критерію радіаційної безпеки питної води щодо наявності в ній вищезазначених РН, процедури підготовки лічильного зразка та особливостей обрахунку спектрів дозволяє оптимізувати систему моніторингових досліджень за радіаційною безпекою питної води джерел водопостачання.

2. Встановлена можливість оцінки реально достатнього об'єму проби води за одержаними в результаті метрологічної атестації характеристиками бета-спектрометра дозволяє розширити межі застосування методу адсорбції катіонів та МВВ на води з підвищеним вмістом мінеральних солей. При цьому показана можливість застосування різного атестованого програмного забезпечення для обрахунку спектрів та встановлення значень питомої активності РН ^{137}Cs та ^{90}Sr без втрати точності та достовірності вимірювань.

3. Наведені вище результати мають і практичне значення. Можливість зменшення початкового об'єму води для досліджень вмісту РН ^{137}Cs і ^{90}Sr особливо важлива при моніторингових дослідженнях якості питної води. Результати даної роботи можуть бути корисними для вирішення задач по дослідженню адсорбції наявних у воді катіонів РН новими сорбентами, при розробці нових МВВ різних РН. Вони також становлять інтерес при вивченні вмісту та міграції РН ^{137}Cs та ^{90}Sr у різноманітних об'єктах екосистем у випадках, коли прогнози очікуваних результатів вимірювання, необхідних характеристик спектрометричної апаратури та показників МВВ, є суттєво важливими для планування таких досліджень.

Список літератури

- 1.** Охорона родючості ґрунтів. – 2011. – Вип. 7. – 137с.
- 2.** Основы сельскохозяйственной радиологии / [Пристер Б. С., Лошилов Н. А., Немец О. Ф., Поярков В. А.]. – К. : Урожай, 1991. – 472 с.
- 3.** Кутлахмедов Ю. О. Основи радіоекології: [навч. посіб.] / Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. – К. : Вища школа, 2003. – 319с.
- 4.** Гродзинський Д. М. Радіобіологія : підруч. / Д. М. Гродзинський. – К. : Либідь, 2001. – 448 с.
- 5.** Перечень населённых пунктов, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения вследствие Чернобыльской катастрофы. Постановление КМ Украины №106 от 01.07.91г. и распоряжение КМ №17 от 12.01.93г.
- 6.** Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді: ГН 6.6.1.1-130-2006. – [Чинний від 2006–06–01].
- 7.** Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН 2.2.4-171-10. – [Чинний від 2010–07–01].
- 8.** Руководство по методам исследования качества воды. Т. 1. Гидрохимия. Радиология. Государственный комитет Украины по водному хозяйству. – К., 1998. – 202с.
- 9.** Фомин Г. С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклоп. словарь / Г. С. Фомин – М. : Протектор, 2000. – 839 с.
- 10.** Методические рекомендации по применению радиологических комплексов с программным обеспечением «Прогресс» для определения проб питьевой воды требованиям радиационной безопасности согласно СанПиН 2.1.4.559-96, СанПиН2юЗю2ю560-96 и ГН 2.6.1.054-96 (НРБ-96).
- 11.** Активність бета-випромінінних радіонуклідів у лічильних зразках водних об'єктів. Методика виконання вимірювань з використанням бета-спектрометрів і програмного забезпечення AKWin. – К. : АКП, 2003. – 36 с.
- 12.** Збірник нормативно-правових документів МОЗ України. – 2006. – №3 (25). – С. 149.
- 13.** Все для измерения ионизирующего излучения. Каталог. – К. : АКП, 2004. – 100 с.
- 14.** Охорона родючості ґрунтів. – 2006. – Вип.2. – 296 с.
- 15.** Методичні вказівки «Відбір проб, первинна обробка та визначення вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs в харчових продуктах» // Санітарний лікар. – 2008. – №3. – С. 84–99.
- 16.** Активність бета-випромінінних радіонуклідів в лічильних зразках. Методика виконання вимірювань з використанням сцинтиляційних спектрометрів і програмного забезпечення AK-1. – К. : АтомКомплекс-Прилад, 1998. – 27 с.
- 17.** Сінченко В. Г. Деякі метрологічні аспекти контролю за безпечним вмістом радіонуклідів в сільськогосподарській та харчовій продукції при прямих спектрометричних вимірюваннях її зразків / В. Г. Сінченко // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: зб. наук. праць Подільського держ. аграрно-технічного ун-ту за матеріалами VI наук.-практ. конф., Кам.-Подільський, листопад 2011 р. – Кам.-Подільський : Каліграф, 2011. – С. 144-147.
- 18.** Бета-спектрометрическое определение радионуклида ^{90}Sr в пробах воды в присутствии гамма-излучающих радионуклидов / [А. П. Красноперова, Г. Д. Юхно, В. И. Мартынова и др.] // Гігієна населених місць. – 2008. – Вип. 52. – С.269-274.

До питання визначення безпечності радіонуклідів Cs-137 та Sr-90 у питній воді природних джерел при моніторингових дослідженнях їх вмісту адсорбційно-спектрометричним методом

Сінченко В.Г., Омельченко Н.М.

Розглянуто задачу встановлення показника радіаційної безпеки при наявності радіонуклідів (РН) ^{137}Cs і ^{90}Sr у питній воді. На основі комплексного підходу досліджено взаємозв’язок між параметрами підготовки лічильного зразка, метрологічними характеристиками бета-спектрометра та критерієм радіаційної безпеки. Визначено межі діапазону варіації питомої активності РН для різних значень досліджуваного об’єму води при умові виконання критерію безпеки. Показана можливість зменшення встановленого методикою виконання вимірювань об’єму проби води за результатами метрологічної атестації бета-спектрометра. Наведено експериментальні дані по встановленню точності вимірювань, визначеню нижньої межі вимірювань питомої

активності РН ^{90}Sr для фіксованого об'єму питної води. Показана відповідність між даними експерименту та результатами розрахунків.

Ключові слова: питна вода; радіонукліди ^{137}Cs і ^{90}Sr ; спектрометрія; показники радіаційної безпеки; моніторинг.

К вопросу определения безопасности радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в питьевой воде природных источников при мониторинговых исследованиях их содержания адсорбционно-спектрометрическим методом

Синченко В.Г., Омельченко Н.Н.

Рассмотрена задача определения показателя радиационной безопасности при наличии радионуклидов (РН) ^{137}Cs и ^{90}Sr в питьевой воде. На основе комплексного подхода исследована взаимосвязь между параметрами подготовки счетного образца, метрологическими характеристиками бета-спектрометра, и критерием радиационной безопасности. Определены пределы диапазона вариации удельной активности РН для разных значений исследуемого объема воды при условии выполнения критерия безопасности. Показанная возможность уменьшения установленного методикой выполнения измерений объема пробы воды по результатам метрологической аттестации бета-спектрометра. Приведены экспериментальные данные по установлению точности измерений, определению нижнего предела измерений удельной активности РН ^{90}Sr , для фиксированного объема питьевой воды. Показано соответствие между данными эксперимента и результатами расчетов.

Ключевые слова: питьевая вода; радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr ; спектрометрия; показатели радиационной безопасности; мониторинг.

To the question to determination radionuclide's safety Cs-137 and Sr-90 in drinking-water of natural sources at monitoring researches of their content by of the adsorption-spectrometry method

Sinchenko V.G., Omelchenko N.N.

Establishment index of radiation safety is considered at presence of radionuclids (RN) ^{137}Cs and ^{90}Sr in drinking-water. Investigated communication between standard source parameters, metrology data of beta-spectrometr and radiation safety criteria. The limits of range of variation of specific activity of RN are certain for the different values of the probed volume of water subject to condition implementation of criterion of safety. The rotined possibility of diminishing of the implementation of measurings of volume of test of water set a method is as a result of metrology attestation of beta-spektrometra. Experimental information is resulted on establishment of exactness of measurings, determination of lower limit of measurings specific activity of RN ^{90}Sr , for the fixed volume of drinking-water. Accordance of information of experiment and results of calculations is routined.

Key words: drinking water, radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr ; spectrometry; indices of radiation safety, monitoring.

Надійшла до редколегії 16.11.2011