

УДК 574::539.1.074

*В. А. Пшеничний, В. М. Архипов, Л. В. Горбиць, Я. А. Жигалов, С. В. Рундюк, В. В. Александрова**ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування» (ДП «ДНІЦ СКАР»)  
Мінерговузлілля України, м. Київ*

## ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПРИРОДНИХ РАДІОНУКЛІДІВ В АЕРОЗОЛЯХ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ АТМОСФЕРИ

Наведено результати, отримані при практичному визначенні концентрацій природних радіонуклідів у аерозолях приповерхневого шару атмосфери на деяких об'єктах уранової промисловості України, їх аналіз та висновки щодо доцільності використання певних детекторних систем.

**Ключові слова:** аерозолі, повітря, природні радіонукліди, активність, гамма-спектрометрія, радіометрія.

Останнім часом посилилась увага до стану повітряного середовища в контексті його забруднення природними радіонуклідами та їх дочірніми продуктами розпаду. Визначення концентрацій радіонуклідів потребує прокачування великих об'ємів повітря (500—1000 м<sup>3</sup>) через аерозольні фільтри з приповерхневого шару атмосфери.

У цій роботі представлено попередній напрацьований в ДП «ДНІЦ СКАР» досвід з визначення активностей природних радіонуклідів у пробах аерозолів приповерхневого шару атмосфери, відібраних на аерозольні фільтри [1—5]. Методика відбору проб аерозолів з приповерхневого шару повітря полягає в тому, що за допомогою фільтра ФПП-15-1,5 на основі тканини Петріянова щільністю 5 мг/см<sup>2</sup> проби об'ємом 500 м<sup>3</sup> відбирають на висоті 2 м від поверхні землі [1]. Наступним кроком є процедура виготовлення зразків з цих аерозольних фільтрів [2]: після розчинення фільтра в ацетоні отримують суспензієподібну масу, яку виділяють, висушують, прокалюють при температурі 450—490 °С, а залишок наносять на алюмінієву підкладку діаметром 28 мм та закріплюють лаком. Як правило, твердий залишок важить від кількох міліграмів до кількох десятків міліграмів. Такі зразки мають незначну кількість радіоактивного матеріалу, тому вимірювання на спектрометрах та радіометрах вимагають великих експозицій, що в свою чергу потребує значної стабільності роботи цих приладів.

Принагідно зауважимо, що для виділення окремих радіонуклідів можуть бути застосовані радіохімічні методики з молекулярними фільтрами [6]. Але цей напрямок є унікальним та багатовитратним, вимагає великої методичної та доказової бази в разі їх використання для конкретних радіонуклідів. Застосовувати цей напрямок проблематично, якщо обсяги поточних екологічних досліджень великі.

Вимірювання невеликих активностей виготовлених проб є складною задачею. Вона потребує визначення, які прилади є найбільш придатними для її вирішення, тому необхідне комплексне застосування різних спектрометрів та радіометрів. Для даних досліджень використовувалися такі детекторні установки:

1. Гамма-спектрометр HPGe GEM-30185. Має захист свинцю приблизно 9 см завтовшки. Використовується для визначення активностей зразків аерозольних фільтрів, які розміщуються на горизонтальній поверхні германієвого детектора. Фон детектора залежить від енергії гамма-піка, що досліджується.

2. Альфа-спектрометр ОСТЕТЕ РС ORTEC із Si-детектором діаметром 24 мм. Фон детектора в межах 1—9 МеВ становить 1 або 2 відліки за годину.

3. Бета-радіометр РУБ-01П. Має захист свинцю приблизно 5 см завтовшки. Фон детектора становить 160—180 відліків за годину.

4. Бета-радіометр-спектрометр. Подібний до бета-радіометра РУБ-01П, з пластмасовим скінтілятором 0,9 мм завтовшки та діаметром 40 мм, що дає змогу робити спектрометричний аналіз імпульсів за амплітудою і, внаслідок цього, дозволяє знизити фон порівняно з РУБ-01П.

У табл. 1 наведено величини фонів та порогів реєстрації (МДА) зазначених установок, якими, зазвичай, укомплектовані радіоекологічні лабораторії.

Дослідження проводилися на чотирьох зразках: двох аерозольних фільтрах (F06 та F08), калібрувальному зразку «Zr-50» з відомими концентраціями радіонуклідів та зразку «Ra-4» з невідомими концентраціями. Розглянемо особливості вимірювань повітряних цих зразків на різних установках (табл. 2).

### Дослідження на гамма-спектрометрі на базі детектора з надчистого германію (HPGe)

У фонових спектрах гамма-спектрометра спостерігаються піки природних радіонуклідів калію-40, урану-238 та торію-232, які присутні в будівельних конструкціях приміщень лабораторії і конструкційних матеріалах детектора та його захисту. Якщо дочірні продукти розпаду зазначених радіонуклідів спостерігаються і в гамма-спектрах аерозольних фільтрів, то це ускладнює надійне визначення їх активності, що можна компенсувати великими експозиціями (до 50 год і більше).

Таблиця 1. Порівняння фонових значень та порогів реєстрації установок, якими визначаються активності аерозольних фільтрів

Детекторна установка	Енергія, кеВ	Ефективність реєстрації	Фон, відліків за годину	Поріг реєстрації активності нуклідів за 50 год (МДА), Бк/зразок
Гамма-спектрометр із детектором GEM-30185	1462 (гамма-вихід — 0,11)	0,0215	57	<sup>40</sup> K: 0,250
	351 (гамма-вихід — 0,373)	0,074	61	<sup>238</sup> U: 0,022
	238 (гамма-вихід — 0,45)	0,088	96	<sup>232</sup> Th: 0,019
Альфа-спектрометр ОСТЕТЕ РС ORTEC з детектором Ø 24 мм	1000—9000	0,20	1—2	<sup>238</sup> U: 0,0003 <sup>232</sup> Th: 0,0003
Бета-радіометр РУБ-01П з Al-фільтром 1,6 мм		0,023	160—180	<sup>238</sup> U+ <sup>232</sup> Th: 0,045
Бета-радіометр-спектрометр з детектором 0,9 мм завтовшки, Ø 40 мм із сцинтиляційної пластмаси	480—840	0,17	125	<sup>210</sup> Bi+ <sup>40</sup> K+ <sup>228</sup> Ac: 0,01
	840—1320	0,028	30	<sup>238</sup> U+ <sup>232</sup> Th: 0,02

Винятком є берилій-7, який утворюється при взаємодії космічного випромінювання з атомами повітря, тому його гамма-лінія з енергією 477 кеВ при вимірюваннях фону відсутня, що допомагає реєструвати розпад цього нукліда у приповерхневому шарі повітря з концентраціями 1,8—5,4 мБк/м<sup>3</sup>.

#### Дослідження на альфа-спектрометрі РС ОСТЕТЕ (США)

Табл. 1 наочно вказує, що альфа-спектрометр ОСТЕТЕ має найнижчий фон порівняно з іншими установками: один-два відліки за годину в діапазоні 1—9 МеВ. Це обумовлює низький поріг реєстрації альфа-випромінюючих радіонуклідів. Але слід мати на увазі особливості вимірів альфа-активності повітряних фільтрів, зразки з яких є достатньо “товстими”, а отже, існує невизначеність результатів вимірювань через втрату поглинутих альфа-частинок. Крім цього, альфа-спектрометр ОСТЕТЕ має поріг реєстрації в 1 МеВ, що призводить до додаткового зменшення активності, яка реєструється детектором. Розрахувати альфа-спектри для таких зразків дуже складно через відсутність відомостей про кількість зерен речовини, їх розподіл за розмірами, формою та наявністю порожот у зернах. Зауважимо, що розрахункові спектри альфа-частинок, які потрапляють до детектора, дуже чутливі до елементного складу зерен зразка. Тому, незважаючи на низький поріг реєстрації (МДА) активності зразка, кількість зареєстрованих альфа-частинок, що вилітають в напрямку детектора, може не відповідати реальним величинам активності радіонуклідів навіть у разі достатньої статистики вимірювань.

Визначаючи активність радію-226 за активністю його дочірніх радіонуклідів, потрібно враховувати виліт радону-222 із зразка. Подібна ситуація виникає під час визначення активності торію-232 при реєст-

рації альфа-частинок з енергією 8,78 МеВ, які належать полонію-212. У даному випадку із зразка еманує радон-220 (торон). Цей процес залежить від товщини зразка та закріплюючого матеріалу. За нашими оцінками, концентрації полонію-210 та полонію-212 у зразку зменшуються порівняно з активністю материнського радію приблизно в 3—5 разів. Якщо альфа-лінія 8,78 МеВ не спостерігається в спектрі, це свідчить про відсутність торію-232 в зразку.

Ще одне зауваження щодо альфа-спектрометрії. Під час досліджень проводилися порівняння результатів вимірювання активностей радію, урану та торію залежно від наявності повітря у вимірювальній камері альфа-спектрометра. Зареєстровані активності можуть зменшуватися за відсутності відкачки повітря в 1,5—2 рази (див. табл. 2).

#### Дослідження на бета-радіометрі РУБ-01П

На бета-радіометрі РУБ-01П було оцінено величини активностей урану-238 та торію-232 за допомогою алюмінієвого фільтра 1,6 мм завтовшки [7]. Ідея полягає в тому, що алюмінієвий фільтр цієї товщини поглинає бета-частинки з енергіями менше ніж 1200 кеВ, кут падіння яких близький до 0°. Із збільшенням кута падіння гранична енергія поглинання бета-частинок наближається до 1800 кеВ. У розпаді продуктів урану-238 та торію-232 існують бета-частинки з енергіями 2200—2300 кеВ, які проходять зазначений фільтр та реєструються детектором. Ефективність реєстрації легко визначається експериментально за допомогою стандартного зразка ітрію-90 ( $E_{\beta}=2200$  кеВ). У разі малих активностей радіонуклідів, що визначаються, та довготривалих експозицій обмеженням у точності такого підходу є повільна зміна фону в межах від 160 до 180 відліків за годину за рахунок нестабільності порогу реєстрації амплітуд імпульсів.

Таблиця 2. Активності природних радіонуклідів двох зразків аерозольних фільтрів та двох калібрувальних зразків, що вимірювалися на різних детекторних установках

Зразок (вага, мг)	Гамма-спектрометр		Бета-радіометр <sup>1)</sup>		Бета-радіометр-спектрометр		Альфа-спектрометр			
	Експозиція ефект/фон, год	Активність р/н, Бк (похибка, %)	Експозиція ефект/фон, год	Активність р/н, Бк (похибка, %)	Експозиція ефект/фон, год	Активність р/н, Бк (похибка, %)	З відкачкою		Без відкачки	
							Експозиція, год	Активність р/н, Бк (похибка, %)		Експозиція, год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F06 (36)	54/36	$^{40}\text{K}: \leq 0,12$ $^{238}\text{U}: 0,015 (68)$ $^{232}\text{Th}: 0,019 (50)$	27/80	$^{210}\text{Bi}: 0,05 (40)^{3)}$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: \leq 0,12$	18/18	$^{210}\text{Bi}: 0,05 (30)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: \leq 0,04$	20	$^{226}\text{Ra}: 0,01 (17)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,01 (8)$ $^{232}\text{Th}: 0,0005 (64)^4$	51	$^{226}\text{Ra}: 0,009 (11)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,007 (20)$ $^{232}\text{Th}: 0,0003 (68)^4$
F08 (16)	18/36	$^{40}\text{K}: \leq 0,35$ $^{238}\text{U}: 0,03 (68)$ $^{232}\text{Th}: \leq 0,04$	27/80	$^{210}\text{Bi}: \leq 0,06^3)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: \leq 0,07$	18/18	$^{210}\text{Bi}: \leq 0,02$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: \leq 0,05$	68		68	$^{226}\text{Ra}: 0,0012 (27)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,0042 (8)$ $^{232}\text{Th}: 0,0003 (40)^4$
«Zr-50» <sup>2)</sup> (50): $^{226}\text{Ra} - 0,12$ Бк; $^{238}\text{U} - 0,18$ Бк; $^{232}\text{Th} - 0,02$ Бк; $^{40}\text{K} - 0$ Бк	18/18	$^{226}\text{Ra}: 0,17 (72)$ $^{238}\text{U}: 0,21 (68)$ $^{222}\text{Rn}: 0,16 (20)$ $^{232}\text{Th}: 0,05 (42)$	35/49	$^{210}\text{Bi}: 0,24 (7)^3)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,14 (25)$	18/18	$^{210}\text{Bi}: 0,16 (17)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,24 (10)$	22		22	$^{226}\text{Ra}: 0,106 (8)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,15 (20)$ $^{232}\text{Th}: 0,0008 (14)^4$
«Ra-4» (2)	1/18	$^{226}\text{Ra}: 1,76 (30)$ $^{238}\text{U}: \leq 0,8$ $^{232}\text{Th}: \leq 0,038$			18/18	$^{210}\text{Bi}: 0,37 (20)$ $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}: 0,27 (11)$	1	$^{226}\text{Ra}: 1,04 (26)$ $^{238}\text{U}: 0,37 (14)$ $^{232}\text{Th}: 0^4)$		

**Примітка.** Під нуклідом  $^{210}\text{Bi}$  із ланцюга розпаду  $^{238}\text{U}$ – $^{226}\text{Ra}$  слід розуміти суму вкладів  $^{210}\text{Bi} + ^{40}\text{K} + ^{228}\text{Ac}$  (останній нуклід є дочірнім продуктом у ланцюгу розпаду  $^{232}\text{Th}$ ).

<sup>1)</sup> Виміри проводилися на радіометрі РУБ-01П із використанням 1,6 мм алюмінієвого фільтра.

<sup>2)</sup> Зразок масою 50 мг було відібрано з проби мінералу масою близькою до 1,3 кг, активність якої була визначена на гамма-спектрометрі.

<sup>3)</sup> Оцінка активності  $^{210}\text{Bi}$  з використанням 0,8 мм алюмінієвого фільтра за умови, що сумарна активність  $^{238}\text{U}$  та  $^{232}\text{Th}$  дорівнює нулю.

<sup>4)</sup> Оцінка активності  $^{232}\text{Th}$  проводилася за спостереженням альфа-частинок з енергією 8,78 МеВ з врахуванням зменшення концентрації  $^{212}\text{Po}$  за рахунок ексхалації  $^{220}\text{Rn}$ .

Підтвердженням цього висновку є оцінка сумарної активності урану та торію для F06 та F08: альфа-спектрометр дає в 10 разів меншу величину активності, ніж заявлений поріг реєстрації бета-радіометра РУБ-01П. Якщо активності урану-238 та торію-232 близькі до нуля, то, використовуючи вдвічі тонший алюмінієвий поглинач (0,8 мм), можна оцінювати активність вісмуту-210 ( $E_{\beta}=1160$  кеВ), що знаходиться в рівновазі зі свинцем-210, який є важливим радіонуклідом (період напіврозпаду — 22,3 роки) для оцінки радіаційного стану повітря в приповерхневому шарі атмосфери.

Оцінка сумарної активності  $^{210}\text{Bi} + ^{40}\text{K} + ^{228}\text{Ac}$  за умови, що активності урану-238 та торію-232 дорівнюють нулю, наведена в графі 5 табл. 2. Ефективність реєстрації бета-частинок у цьому випадку визначалася за зразком ітрію-90.

### Дослідження на бета-радіометрі-спектрометрі

Бета-радіометр-спектрометр, подібний до бета-радіометра РУБ-01П, має пластмасовий сцинтилятор 0,9 мм завтовшки з діаметром 40 мм. Завдяки більшій товщині детектора, ніж товщина детектора РУБ-01П, виникає можливість аналізувати імпульси бета-частинок за енергією в усьому діапазоні та виділяти області з більш низьким фоном. Використовуючи різні алюмінієві фільтри-поглиначі, можна реєструвати бета-частинки певних енергій, тим самим зменшуючи вклад гамма-фону (табл. 1). Фон бета-радіометра-спектрометра в області 840—1320 кеВ у 5,5 раза менший за фон бета-радіометра РУБ-01П, що дає змогу реєструвати сумарну активність урану-238 та торію-232, більшу за 0,02 Бк, при експозиції 50 год. Для порівняння на бета-радіометрі РУБ-01П з використанням алюмінієвого фільтра 1,6 мм завтовшки при експозиції в 50 год визначаються активності урану-238 та торію-232, більші за 0,045 Бк (табл. 1). Якщо активності урану-238 та торію-232 близькі до нуля, то, використовуючи алюмінієвий поглинач, що поглинає бета-частинки з енергіями, меншими за 500 кеВ, можна оцінювати сумарну бета-активність  $^{210}\text{Bi} + ^{40}\text{K} + ^{228}\text{Ac}$  з енергіями бета-частинок 1,1—1,3 МеВ. Ефективність реєстрації вісмуту-210 легко визначається експериментально за допомогою еталонного зразка КСІ з розрахунковою активністю калію-40 ( $E_{\beta}=1330$  кеВ). У випадку значущих сумарних активностей урану-238 та торію-232 потрібні додаткові оцінки вкладу бета-частинок з енергіями, близькими до 2,2 МеВ, в області реєстрації бета-частинок від  $^{210}\text{Bi} + ^{40}\text{K} + ^{228}\text{Ac}$ . Експериментальній оцінці цього вкладу та особливостям роботи бета-радіометра-спектрометра буде присвячено окрему роботу.

### Узгодження результатів, отриманих при дослідженнях на різних установках

Зразок «Zr-50» масою 50 мг було відібрано з проби мінералу масою 1,3 кг, активність радіонуклідів якої визначено на гамма-спектрометрі. Якщо зразок «Zr-50» є репрезентативним для всієї проби, то активності основних радіонуклідів мають відповідати величинам, наведеним у графі 1 табл. 2 (сумарна активність урану-238 та торію-232 дорівнює 0,20 Бк).

Гамма-спектрометричні вимірювання зразка «Zr-50» визначають активності урану-238 та торію-232 за 18-годинну експозицію в 0,21 Бк (з похибкою 68 %) та 0,05 Бк (з похибкою 42 %), відповідно, що дає сумарну активність цих радіонуклідів в 0,26 Бк. Бета-радіометричні вимірювання цього зразка дають сумарну активність урану-238 та торію-232 (за 35-годинну експозицію) в 0,14 Бк (з похибкою 25 %). На бета-радіометрі-спектрометрі ця величина за 18-годинну експозицію дорівнює 0,24 Бк (з похибкою 10 %), на альфа-спектрометрі без відкачки за 22-годинну експозицію — 0,15 Бк (з похибкою 20 %). Можна вважати, що всі виміри на всіх установках узгоджуються між собою. Середнє значення сумарної активності урану-238 та торію-232 для чотирьох установок дорівнює 0,20 Бк (з похибкою 44 %), що відповідає заявленим концентраціям у зразку «Zr-50». Зрозуміло, що збільшення експозиції вимірів привело би до більшої відповідності вимірюваної сумарної активності урану-238 та торію-232 на кожній установці.

Вимірювання зразка «Zr-50» на гамма-спектрометрі визначають наявність ще двох радіонуклідів — радію-226 та радону-222: перший — за наявністю піка з енергією 186 кеВ, що належить радію-226 з активністю 0,17 Бк (похибка — 72 %), а другий — за піками 295 кеВ та 351 кеВ, що належать свинцю-214, який відноситься до ланцюга розпаду радону-222 з активністю 0,16 Бк (похибка — 20 %). Близькі величини активностей радію-226 та радону-222 вказують на те, що радон надійно зв'язується в кристалічній структурі мінералу, а це означає, що концентрація вісмуту-210 має відповідати концентрації радію-226. Проведені без відкачки повітря дослідження цього зразка на альфа-спектрометрі визначають активність радію-226 на рівні 0,106 Бк (з похибкою 8 %), що не суперечить результатам вимірювань на гамма-спектрометрі.

Оцінку активності вісмуту-210 на бета-радіометрі через некоректне визначення ефективності реєстрації бета-частинок та припущення, що сумарна активність урану-238 та торію-232 дорівнює нулю, можна не враховувати. А виміри на бета-радіометрі-спектрометрі визначають активність вісмуту-210, яка не суперечить активності радію-226, що вимірюється на гамма-спектрометрі (відхилення в межах 25 %).

Активність вісмуту-210 дорівнює 0,16 Бк (з похибкою 17 %). Отже, для зразка «Zr-50» активність вісмуту-210 відповідає активностям радію-226 у 0,17 Бк (похибка — 72 %, гамма-спектрометр) та 0,106 Бк (похибка — 8 %, альфа-спектрометр без відкачки повітря). Тобто в зразку «Zr-50» радій-226 знаходиться в рівновазі з  $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi}$ .

Зразок «Ra-4» було виготовлено за допомогою важкої азотною кислотою з ґрунту, забрудненого радієм. У цьому зразку, окрім радію-226, не був відомим вміст інших радіонуклідів. Виміри активностей урану-238 та радію-226 на гамма-спектрометрі, бета-радіометрі-спектрометрі та альфа-спектрометрі узгоджуються поміж собою. В спектрі альфа-частинок спостерігався пік з енергією 4,7 МеВ, який плавно спадав до енергії 1 МеВ. У цей інтервал попадають альфа-частинки урану-238 ( $E_\alpha=4,2$  МеВ) та торію-232 ( $E_\alpha=4,0$  МеВ). Через достатньо велику товщину зразка розділити їх неможливо, як і виділити окремий пік радію-226 ( $E_\alpha=4,78$  МеВ) серед альфа-частинок урану-234 ( $E_\alpha=4,77$  МеВ) та торію-230 ( $E_\alpha=4,69$  МеВ). Активність радію-226 була оцінена за спостереженням альфа-частинок з енергією 7,7 МеВ, які продукує полоній-214, що є дочірнім продуктом розпаду радону-222. При цьому враховувалася величина екshalації радону зі зразка. Наші оцінки вказують на те, що в зразку залишається приблизно 1/5—1/3 ядер радону. Якщо вважати, що в зразку залишається 1/4 дочірніх продуктів розпаду радону, то, використовуючи активності урану-238 та торію-232 з вимірювань на альфа-спектрометрі, можна оцінити активність вісмуту-210 у 0,37 Бк (з похибкою 20 %). Цей результат показовий тим, що в зразку «Ra-4» свинець-210 не знаходиться в рівновазі з радієм-226.

Фільтри F06 та F08 мають різну масу твердого залишку — 36 мг та 16 мг, відповідно, але сумарна активність урану-238 та торію-232 в обох зразках за вимірами на альфа-спектрометрі становить однакову величину (приблизно 0,01 Бк). На інших детекторних установках можна зробити тільки порогову оцінку (МДА). На бета-радіометрі-спектрометрі можна надійно визначити активність вісмуту-210 (табл. 2, графа 7). Вимірювання на гамма-спектрометрі для цих зразків, навіть при експозиції 54 год, не дають достовірної інформації щодо активності урану-238 та торію-232 (табл. 2, графа 3).

### Основні результати вимірювань повітряних фільтрів на детекторних установках

1. Вимірювання аерозольних фільтрів для визначення активностей основних природних радіонуклідів на обраному нами гамма-спектрометрі навіть при великих експозиціях не дають достовірних оцінок. Порогам реєстрації калію-40, урану-238 та торію-232, наведеним у табл. 1, відповідають концентрації цих

радіонуклідів у повітрі в 500 мкБк/м<sup>3</sup>, 44 мкБк/м<sup>3</sup> та 38 мкБк/м<sup>3</sup>.

2. Найбільш низькофононим приладом є альфа-спектрометр, який визначив сумарну концентрацію урану-238 та торію-232 в повітрі на рівні 20 мкБк/м<sup>3</sup> (похибка — 8 %). Але в цих вимірах присутня систематична похибка, індивідуальна для кожного фільтра залежно від товщини виготовленого зразка.

Наявність радію-226 в зразку можна надійно визначити за допомогою альфа-лінії з енергією 7,7 МеВ: його концентрація в повітрі для фільтра F06 становить 20 мкБк/м<sup>3</sup> (похибка — 17 %).

Якщо визначати активність торію-232 у фільтрі F06 за лінією 8,78 МеВ, то це відповідає його концентрації в повітрі в 1 мкБк/м<sup>3</sup> (похибка — 64 %).

Вимірювання на альфа-спектрометрі треба обов'язково проводити з відкачкою, а матеріал зразка надійно закріплювати на підкладці.

3. Бета-радіометр РУБ-01П через досить великий фон приладу має поріг реєстрації урану-238 та торію-232 на рівні 0,1 Бк, що відповідає їх сумарній концентрації в повітрі 200 мкБк/м<sup>3</sup>. Якщо в зразку повітряного фільтра вони відсутні, можна визначити сумарну концентрацію вісмуту-210, калію-40 та актинію-228 за допомогою еталонного зразка КСІ.

4. Прийнятним для вимірів аерозольних фільтрів є бета-радіометр-спектрометр, поріг реєстрації якого для визначення сумарної активності урану-238 та торію-232 становить близько 50 мБк. Активність вісмуту-210 можна визначити тільки на бета-радіометрі-спектрометрі з алюмінієвими поглиначами. Для досліджуваного фільтра F06 концентрація радіонукліду вісмут-210 у приповерхневому шарі атмосфери дорівнює 100 мкБк/м<sup>3</sup> (з похибкою 30 %), а для фільтра F08 значущої величини концентрації цього радіонукліду не було отримано, порогове значення — 40 мкБк/м<sup>3</sup>.

5. У фільтрах на гамма-спектрометрі надійно спостерігали берилій-7, який утворюється при взаємодії космічного випромінювання з атомами повітря, з концентраціями для фільтра F06  $5,1 \pm 0,4$  мБк/м<sup>3</sup>, а для F08 —  $1,8 \pm 0,3$  мБк/м<sup>3</sup>.

### Висновки

Висновки цієї роботи корисні не тільки для спеціалістів з радіоекології, але й для тих, хто приймає рішення щодо вимірювань повітряних проб у лабораторіях, які створені для визначення активностей більше за 1 Бк. Повітряні проби мають активності менші за 0,01 Бк.

Автори перепрошують читача за велику кількість цифрових даних з активності природних радіонуклідів всього для чотирьох зразків, з яких тільки два належать до повітряних фільтрів. Кропітка й напружена робота з відбору проб, виготовлення зразків та тривала експозиція в 2—3 доби самих вимірів, обробка результатів нерідко приносять лише невизначеність.

Причина такої невдачі полягає в тому, що всі детекторні установки, за допомогою яких досліджують повітряні фільтри, за параметрами мають належати до низькофононих.

1. До низькофононих з усіх обраних нами детекторних пристроїв можна віднести тільки альфа-спектрометр. Найменш придатним для таких вимірювань є бета-радіометр РУБ-01П через досить великий фон. Його може замінити бета-радіометр-спектрометр з товщиною детектора близько 1 мм, яку можна варіювати для досягнення оптимальних відношень ефекту до фону. Тому нами був створений бета-радіометр-спектрометр з детектором зі скінцифійної пластмаси 0,9 мм завтовшки.

2. Гамма-спектрометр є детекторним пристроєм, який особливо потребує вдосконалення щодо зменшення порогів реєстрації за рахунок збільшення товщини свинцевого захисту та оптимального розміщення детектора в будівлі. Розміщення гамма-спектрометра на цокольному поверсі в бетонній ніші — це одне, а зовсім інше — просторе приміщення на 3-му поверсі. Згідно з нашими вимірюваннями фон від калію-40 в 1,9 рази менший для 3-го поверху. Зменшення фону

від ланцюгів розпаду урану-238 та торію-232 теж спостерігається, але тут визначальним чинником є активність цих радіонуклідів у будівельних матеріалах перекриттів та стін. А збільшення товщини свинцевого захисту на 5 см може зменшити фон у 2—3 рази. Оптимізація розміщення гамма-детектора та його захисту може зменшити поріг реєстрації в 2—3 рази, що є умовою достовірного визначення концентрацій природних радіонуклідів у повітряних пробах.

3. Активності повітряних фільтрів мають вимірюватися на альфа-, бета- та гамма-детекторних пристроях, а результати їх узгоджуватися між собою.

Можна рекомендувати такий порядок вимірів:

– гамма-спектрометрія сухої суспензії фільтрів (до прокалювання) для визначення активностей берилію-7 та природних радіонуклідів з експозицією не менше ніж 48 год;

– прокалювання сухої суспензії фільтрів та приготування хоча би двох зразків твердих залишків масою близько 6 мг для вимірювань на альфа-спектрометрі з експозицією не менше ніж 18 год і решти — для вимірювань на бета-радіометрі-спектрометрі з експозицією не менше ніж 18 год.

### Список використаної літератури

1. *СТП 03.040-2003*. Методика відбору проб аерозолів на фільтри методом прокачування повітря / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2003.
2. *СТП 03.066-2008*. Методика підготовки вимірювальних зразків із аерозольних повітряних фільтрів / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2008.
3. *СТП 03.067-2008*. Методика визначення вмісту Ra-226, Th-232, U-234, U-235, U-238 у приземному шарі атмосферного повітря гамма-спектрометричним методом / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2008.
4. *СТП 03.068-2008*. Методика визначення об'ємної активності аерозолів рудного пилу у приземному шарі атмосферного повітря за сумарною альфа-активністю / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2008.
5. *СТП 03.070-2008*. Методика визначення вмісту  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  у приповерхневому шарі атмосферного повітря альфа-спектрометричним методом / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2008.
6. Measurement of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , and  $^{210}\text{Bi}$  in Size-Fractionated Atmospheric Aerosols: An Estimate of Fine-Aerosol Residence Times / Nancy A. Marley, Jeffrey S. Gaffney, Paul J. Drayton, Mary M. Cunningham, Kent A. Orlandini, and Rajendra Paode // *Aerosol Science and Technology*. — 2000. — V. 32. — Environmental research division, Argonne National Laboratory, Argonne. — P. 569—583.
7. *СТП 03.071-2008*. Методика визначення вмісту U-238 та Th-232 у приповерхневому шарі атмосферного повітря бета-радіометричним методом / Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування (ДНІЦ СКАР). — К., 2008.

Отримано 22.02.2013