

О. В. Михайлов¹, І. С. Скітер¹, О. В. Мясников², Т. В. Тимошенко²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна,

² ДСП «Чорнобильська АЕС», Славутич, Київська обл., 07101, Україна

Дослідження розподілу питомої активності реперних нуклідів у металовідходах, що спрямовуються ДСП «Чорнобильська АЕС» на звільнення від регулюючого контролю, та оцінка їхньої відповідності діючому радіонуклідному вектору

Ключові слова:

Чорнобильська АЕС,
партія металовідходів,
звільнення від регулюючого
контролю,
реперні радіонукліди,
питома активність,
радіонуклідний вектор,
коефіцієнти масштабування

Проведено статистичний, регресійний та кластерний аналіз даних щодо питомої активності реперних радіонуклідів (^{60}Co , ^{137}Cs) та відношення їхньої активності в партіях металовідходів ДСП «Чорнобильська АЕС», що підлягають звільненню від регулюючого контролю. Об'єктами дослідження були результати вимірювань 11 контейнерів із радіоактивно забрудненим металобрухтом, що пройшли радіаційний контроль на установці FRM-03 (виробництва Чехії) після їхньої дезактивації. Запропоновано кількісний критерій оцінки відповідності партій металовідходів діючому радіонуклідному вектору, встановленому раніше за спеціальною методикою та результатами проведеної науково-дослідної роботи.

Вступ

Початок робіт із демонтажу конструкцій енергоблоків ДСП «Чорнобильська АЕС» призвів до появи значної кількості металовідходів, дезактивація яких може забезпечити зниження їхнього радіоактивного забруднення до рівнів, що дозволяють їхнє вивезення за межі зони відчуження та повернення в господарський обіг для використання в металургійній промисловості країни. Основним нормативним документом, в якому встановлені критерії, вимоги та порядок звільнення радіоактивних матеріалів (РМ) від регулюючого контролю є НП 306.4.159-2010 [1]. На діючих АЕС України порядок дій у цьому напрямі поведження з РМ визначено у стандарті НАЕК «Енергоатом» СОУ НАЕК 260:2022 [2]. На кожній АЕС заплановано створення дільниць із можливістю сортування, обробки та формування партій РМ (ПРМ), а також розгортання вимірювального комплексу для визначення

їхніх радіаційних характеристик [3]. З цією метою на промайданчику ДСП «Чорнобильська АЕС» було створено стаціонарну установку гамма-спектрометричного контролю FRM-03 (виробництва Чехії) для визначення питомої активності радіонуклідів у металовідходах, що спрямовуються на звільнення від регулюючого контролю [4]. За допомогою FRM-03 вимірюють активність реперних радіонуклідів (РР, або KN від *key nuclides* в англомовній літературі) ^{137}Cs та ^{60}Co , а також інших гамма-випромінювачів у складі ПРМ. Активність радіонуклідів, що не можуть бути виміряні за допомогою гамма-спектрометрії, так звані радіонукліди, що важко вимірюються (РВВ, або DTM від *difficult to measure radionuclides* в англомовній літературі), відповідно до рекомендацій Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [5, 6] розраховують із застосуванням коефіцієнтів масштабування (КМ, або SF від *scaling factors* в англомовній літературі), які є середнім відношенням активності РВВ до ак-

тивності РР. Таким визнанням у світовій практиці способом мінімізуються час та матеріальні витрати для радіологічної характеристики радіоактивних відходів, що спрямовуються на тимчасове зберігання або захоронення в спеціальних сховищах чи звільнення від регулюючого контролю. Для твердих радіоактивних відходів (ТРВ) на ДСП «Чорнобильська АЕС» процедура встановлення числових значень КМ, набір яких називають радіонуклідним вектором (РВ), регламентована стандартом підприємства [7]. Для металовідходів, що спрямовуються на звільнення від регулюючого контролю відповідно до вимог [1], РВ встановлений за спеціально розробленою методикою [8] та результатами науково-дослідної роботи [9], в якій було оцінено відношення активності РВВ та РР у різних партіях металовідходів до та після їхньої дезактивації.

Відповідно до порядку звільнення РМ від регулюючого контролю [1], за результатами проведеного радіаційного контролю має бути оцінена сума зважених за рівнями звільнення виміряних значень питомої активності радіонуклідів, яка не може перевищувати 1. За алгоритмом розрахунку, викладеним у [9], до цієї суми має бути додана її невизначеність, що є сумою невизначеностей застосованих КМ. У програмному забезпеченні FRM-03 такий розрахунок передбачений і виконується. Однак у процесі дослідно-промислової експлуатації установки звільнення металовідходів від регулюючого контролю виявлено проблему. За деякими результатами вимірювань ПРМ — контейнерів із металовідходами — відношення активності РР (^{137}Cs до ^{60}Co або навпаки) у складі дезактивованого металу суттєво, у рази, відрізнялося від розрахованого в [9] його середнього значення. Унаслідок цього застосування КМ, що відповідають різним РР, призводило до отримання розрахункових даних щодо питомої активності РВВ у ПРМ, які не збігалися в межах допустимої похибки визначення. Виникло питання щодо можливості застосування діючого РВ до ПРМ за наявності таких «аномальних» результатів вимірювань та розрахунку вищезазначеної суми, від значення якої залежить висновок щодо звільнення чи незвільнення ПРМ від регулюючого контролю. У роботі [9] це не було передбачено. У зв'язку з цим виявилось актуальним дослідити особливості розподілу питомої активності РР ^{137}Cs та ^{60}Co в різних партіях дезактивованого металу та визначити, яким чином застосовувати діючий РВ до ПРМ за наявності «аномальних» результатів радіаційного контролю.

Метою роботи було проведення аналізу результатів вимірювань питомої активності РР ^{137}Cs та ^{60}Co

в металовідходах ДСП «Чорнобильська АЕС», отриманих за допомогою установки FRM-03, та визначення за яких умов або за яким кількісним критерієм діючий РВ може бути застосований до ПРМ, що спрямовуються на звільнення від регулюючого контролю.

Об'єкти та методи досліджень

Об'єктами дослідження були результати вимірювань питомої активності гамма-випромінюючих РР ^{137}Cs та ^{60}Co , отримані за допомогою установки гамма-спектрометричного контролю FRM-03 у ПРМ ДСП «Чорнобильська АЕС», що спрямовуються на звільнення від регулюючого контролю. Установка FRM-03 призначена для вимірювання питомої та сумарної активності металевих брухт, завантаженого в контейнер із габаритними розмірами $3 \times 1 \times 1,2$ м, та складається з таких основних частин (рис. 1, а):

- кліматична кабіна з розміщенням усередині захисним боксом, в якому виконується вимірювання;
- транспортна система (напрямні рейки, запобіжна рама, транспортний візочок).

Вимірювання активності реперних та інших гамма-випромінюючих радіонуклідів у складі металовідходів в екранованому тунелі та в кліматичній камері, в якій підтримується необхідний температурно-вологісний режим, виконується за допомогою устаткування:

- трьох напівпровідникових блоків детектування на основі детекторів гамма-випромінювання в діапазоні від 50 кеВ до 3 МеВ з особливо чистого германію (HPGe) типу GC 4518-CP5-PLUS-SL;

- трьох коліматорів;

- трьох багатоканальних амплітудних аналізаторів спектрів типу Lynx;

- трьох систем охолодження детекторів типу Cryo-Pulse 5 Plus;

- двох промислових комп'ютерів із програмним забезпеченням, що використовуються для управління процесами вимірювання та відображення результатів аналізу виміряних спектрів і визначення питомої активності радіонуклідів у складі РМ.

Контейнер із ПРМ із подрібненого металобрухту автоматично транспортується до вимірювальної камери (рис. 1, б), де визначається його маса та рівень його заповнення. Вимірювання питомої активності радіонуклідів виконується всередині кліматичної кабіни шляхом сканування сегментів із бокових сторін та верхньої частини контейнера під час переміщення транспортного візочка по направляючих рейках під несучою рамою з трьома рухомими блоками детектування.

Результати проведених вимірювань реєструються в локальній базі даних на сервері, що забезпечує ведення електронного журналу обліку даних із формуванням протоколу вимірювань. Для розрахунку активності РВВ програмне забезпечення FRM-03 використовує результати вимірювань активності РР ^{137}Cs або ^{60}Co , залежно від вибору оператором опції програми обробки отриманих даних, та відповідні значення КМ (табл. 1).

Діапазон реєстрації питомої активності радіонуклідів становить:

- від 0,01 до 1000 Бк/г — для ^{241}Am ;
- від 0,0013 до 1000 Бк/г — для ^{137}Cs ;
- від 0,0005 до 10^6 Бк/г — для ^{60}Co .

Детально опис установки FRM-03 та порядок дій оператора до отримання рекомендацій про звільнення/незвільнення виміряної ПРМ відповідно до вимог [1] за допомогою встановленого програмного забезпечення наведено в «Інструкції з експлуатації стаціонарної установки гамма-спектрометричного контролю FRM-03» (63Е-ЦРБ) [4].

Вибіркова сукупність даних, яка була використана для статистичного, регресійного та кластерного аналізу, складалась із 69 результатів (протоколів) визначення питомої активності РР (^{137}Cs , ^{60}Co) та РВВ у металовідходах, отриманих для 11 контейнерів. Кількість вимірювань для одного контейнера становила від трьох до шести (або 12 у випадку проведення повторного вимірювання) залежно від кількості секторів, обраних програмним забезпеченням установки від ступеня визначеної неоднорідності розподілу радіоактивності в об'ємі контейнера.

Під час проведення дослідження вирішувалися такі завдання:

визначити параметри статистичного розподілу питомої активності РР (^{137}Cs , ^{60}Co) та відношень їхньої питомої активності ($^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ та $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$) у металовідходах;

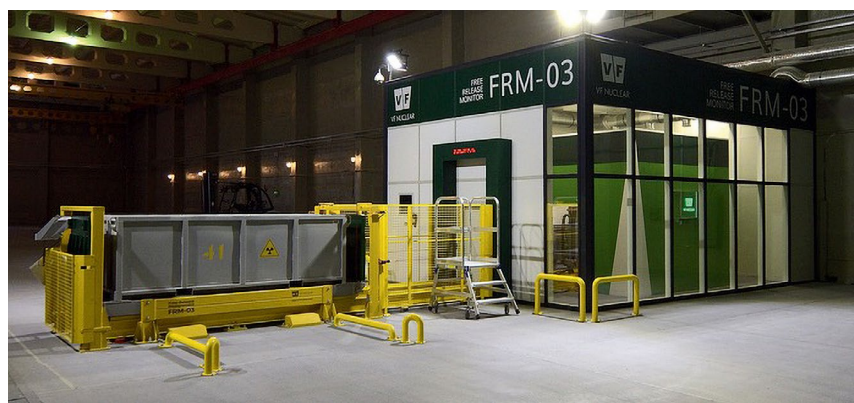
встановити, які існують кореляції між питомою активністю РР у металовідходах, а також між відношенням їхньої питомої активності та питомою активністю окремого РР;

дослідити, на підставі яких кількісних критеріїв можна зробити однозначний висновок про те, що до виміряного контейнера можна застосувати КМ діючого РВ (див. табл. 1) для визначення питомої активності РВВ та встановлення відповідності ПРМ критерію звільнення від регулюючого контролю.

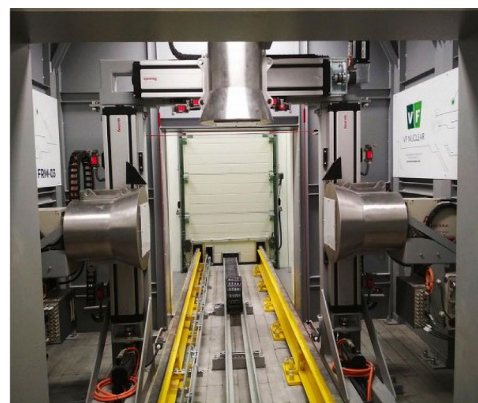
Статистичний та регресійний аналіз даних вимірювань проводився із застосуванням прикладних програм офісного пакету Microsoft Office. Кластерний аналіз вибірки даних виконувався із застосуванням програми *Cluster Analysis Calculator Statistics Kingdom* (<https://www.statskingdom.com/cluster-analysis.html>) відповідно до методичних підходів [10, 11] для отримання однорідних груп результатів вимірювань питомої активності РР у ПРМ та подальшого їхнього статистичного аналізу в межах окремої групи. Не обмежуючись результатами кластерного аналізу до підвибірок даних, що об'єднували результати вимірювань тільки одного контейнера, додатково було застосовано критерій відповідності середнього геометричного значення відношення питомої активності РР ($SF_{\text{Co/Cs}}$ або $SF_{\text{Cs/Co}}$) до границь інтервалу

$$SF_{\text{РВВ/РР}} \pm U_c (SF_{\text{РВВ/РР}}),$$

де $SF_{\text{РВВ/РР}}$ — позначення КМ; $U_c (SF_{\text{РВВ/РР}})$ — сумарна невизначеність КМ.



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) та зона гамма-спектрометричного контролю (б) установки звільнення матеріалів від регулюючого контролю ДСП «Чорнобильська АЕС» FRM-03

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів масштабування ($SF_{PBB/PP}$) та їхньої невизначеності (U_c), що відповідають реперним нуклідам для потоку дезактивованого металу станом на 2024 р.

Радіонуклід	Реперний радіонуклід ^{137}Cs		Реперний радіонуклід ^{60}Co	
	$SF_{PBB/PP}$	U_c	$SF_{PBB/PP}$	U_c
^{60}Co	0,306	0,259	1,0	–
^{63}Ni	4,82	4,26	15,7	18,0
^{90}Sr	0,0492	0,0242	0,161	0,141
^{90}Y	0,0492	0,0242	0,161	0,141
^{137}Cs	1,0	–	3,26	2,76
^{238}Pu	0,0053	0,0027	0,0173	0,0154
$^{239+240}\text{Pu}$	0,00281	0,00244	0,00918	0,0104
^{241}Am	0,0185	0,0235	0,0602	0,0884

Примітка. Позначення коефіцієнтів масштабування, їхнього значення та невизначеності наведено відповідно до [8, 9].

У табл. 1 наведено числові значення КМ, які становлять фактично два РВ та дозволяють визначити питому активність РВВ у складі ПРМ шляхом множення вимірної питомої активності РР на відповідне значення $SF_{PBB/PP}$ залежно від того, який гамма-випромінюючий нуклід (^{60}Co або ^{137}Cs) обрано як реперний.

Якщо за серією вимірювань контейнера середнє геометричне значення відношення питомої активності ^{137}Cs до ^{60}Co або, навпаки, у металовідходах знаходилося в межах від $SF_{PBB/PP} - U_c$ до $SF_{PBB/PP} + U_c$ (див. табл. 1), приймалось рішення віднести його до групи, у межах якої діючий РВ може бути застосований, якщо ні — до іншої групи. У такий спосіб визначався перелік контейнерів, для яких відповідно до відомих методичних підходів, зображених у [12–14], діючі значення КМ мають бути підтверджені (верифіковані) або встановлені нові, що відповідають новим характеристикам радіоактивного забруднення, визначеним для вимірної партії металовідходів.

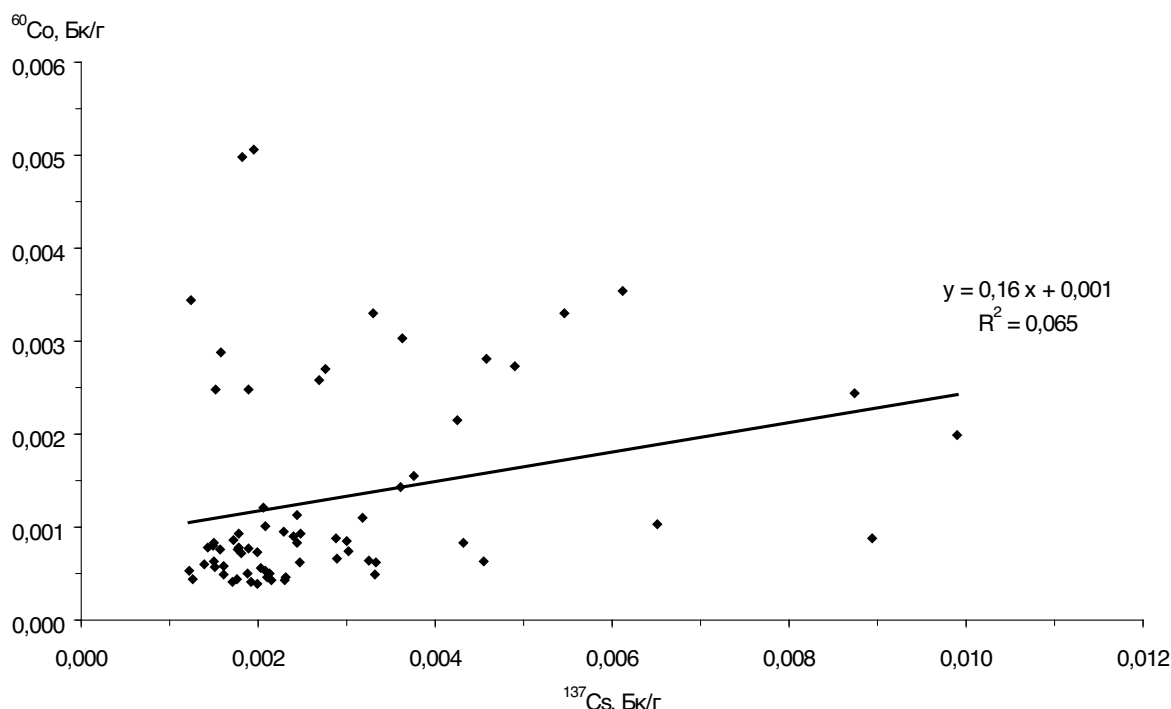
Результати та обговорення

Результати статистичного аналізу розподілу питомої активності РР у металовідходах для сумарної вибірки даних відображено на рис. 2 та в табл. 2. Одиниці вимірювання питомої активності РР наведено в Бк/г відповідно до [1] для радіонуклідів штучного походження, якими є ізотопи ^{137}Cs до ^{60}Co . Якщо не розділяти результати вимірювань на окремі кластери, як це зроблено далі, показники середнього значення відношення активності РР (середнє геометричне, мода, медіана; див. табл. 2) та діючих КМ ($SF_{PBB/PP}$) для РР (див. табл. 1) відрізняються несуттєво: у межах 22–31 % — для $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ та в межах 18–23 % — для $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. Однак форма розподілу питомої активності РР та їхнього відношення в дезактивованому металі має широкий розмах, значну правосторонню асиметрію та варіабельність середнього значення (див. табл. 2).

За результатами регресійного аналізу сумарної вибірки даних встановлено наявність:

Таблиця 2. Основні статистичні показники розподілу експериментальних даних

Статистичний показник	Питома активність, Бк/г		Відношення питомої активності	
	^{137}Cs	^{60}Co	$^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$
Середнє геометричне	0,0025	0,0010	0,401	2,496
Мода	0,0018	0,0008	0,375	2,667
Медіана	0,0021	0,0008	0,377	2,649
Середнє квадратичне відхилення	0,0018	0,0011	0,561	1,805
Коефіцієнт асиметрії	2,3	1,7	2,9	1,2
Коефіцієнт варіації, %	72,6	112,7	140,0	72,3

Рис. 2. Поле кореляції «питома активність ^{137}Cs – питома активність ^{60}Co »

слабкого позитивного зв'язку між активністю ^{60}Co та ^{137}Cs у металовідходах ($r = 0,26$, див. рис. 2);

тісного кореляційного зв'язку між відношенням активності $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ та питомою активністю ^{60}Co ($r = 0,80$ для лінійної форми залежності, рис. 3);

слабкого кореляційного зв'язку між відношенням активності $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ та питомою активністю ^{137}Cs ($r = -0,22$ для лінійної форми залежності, рис. 4);

помітного кореляційного зв'язку між відношенням активності $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ та питомою активністю ^{60}Co ($r = -0,58$ для лінійної форми залежності, рис. 5);

помірного кореляційного зв'язку між відношенням активності $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ та питомою активністю ^{137}Cs ($r = 0,42$ для лінійної форми залежності, рис. 6).

Таким чином, загалом між активністю ^{137}Cs та ^{60}Co у дезактивованому металі є лише слабкий позитивний зв'язок (див. рис. 2), але в інших полях кореляції, особливо між їхнім відношенням та РР ^{60}Co , існує більш ніж помітний зв'язок (див. рис. 3 і 5). У поєднанні зі встановленими функціональними залежностями (рівняннями регресії), наведеними на рис. 3–6, це дає можливість достатньо надійно окреслити границі питомої активності ^{60}Co у дезактивованому металі, у межах яких відношення $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ або $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ буде відповідати значенням КМ у табл. 1. Для питомої активності ^{137}Cs такі границі для відношення активності РР також можна визначити, але з огляду на зна-

чення коефіцієнта кореляції (див. рис. 4 і 6) ступінь надійності такої оцінки буде суттєво менш надійним порівняно з РР ^{60}Co .

Результати кластерного аналізу даних, оцінки характеристик розподілу відношення активності РР за окремими кластерами та переліку контейнерів, результати вимірювання яких відповідають тому чи іншому кластеру, подано в табл. 3 та 4 (n – кількість результатів вимірювань, $M \pm \Delta$ – 95 % довірчий інтервал середнього геометричного значення відношення активності РР, позначеного як M ; Δ – ширина цього інтервалу; δ – відносна похибка оцінки M ($\delta = \Delta/M \cdot 100$ %). Отримані результати підтвердили наявність у сумарної вибірки даних, відображеної на рис. 2, кількох підвибірок – кластерів, що відрізняються статистичними параметрами розподілу питомої активності РР у дезактивованих металовідходах (див. табл. 3 і 4). Існує чітко виражена зона («хмара») розсіювання даних у межах кластера, яка не перетинається із зонами розсіювання даних іншого кластера. Відповідно до змісту кластерів було визначено перелік контейнерів, результати вимірювання яких присутні в тому чи іншому кластері даних.

Однак, як можна бачити з табл. 3 і 4, за результатами проведеної кластеризації даних виявилось, що не всі контейнери можна віднести тільки до однієї групи. Це можна пояснити наслідком неоднорідного

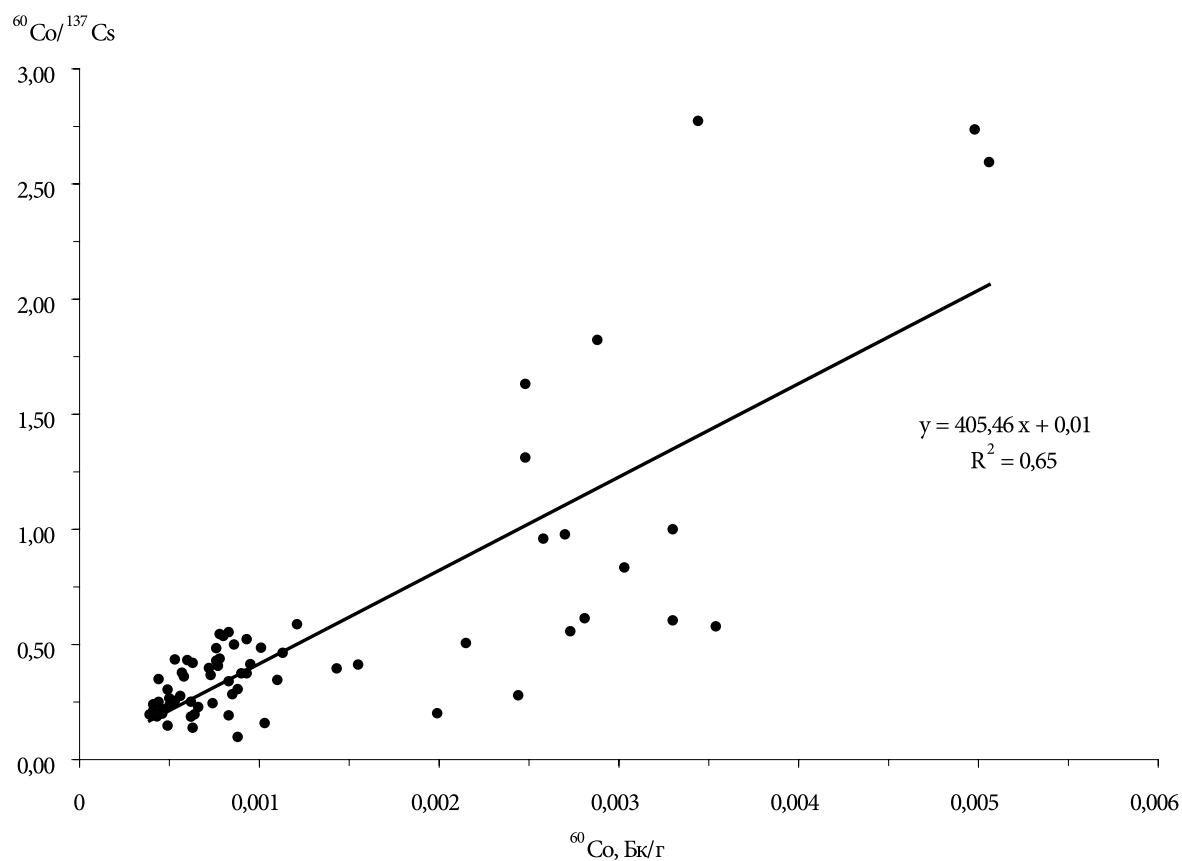


Рис. 3. Поле кореляції «відношення активності нуклідів $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ — питома активність ^{60}Co »

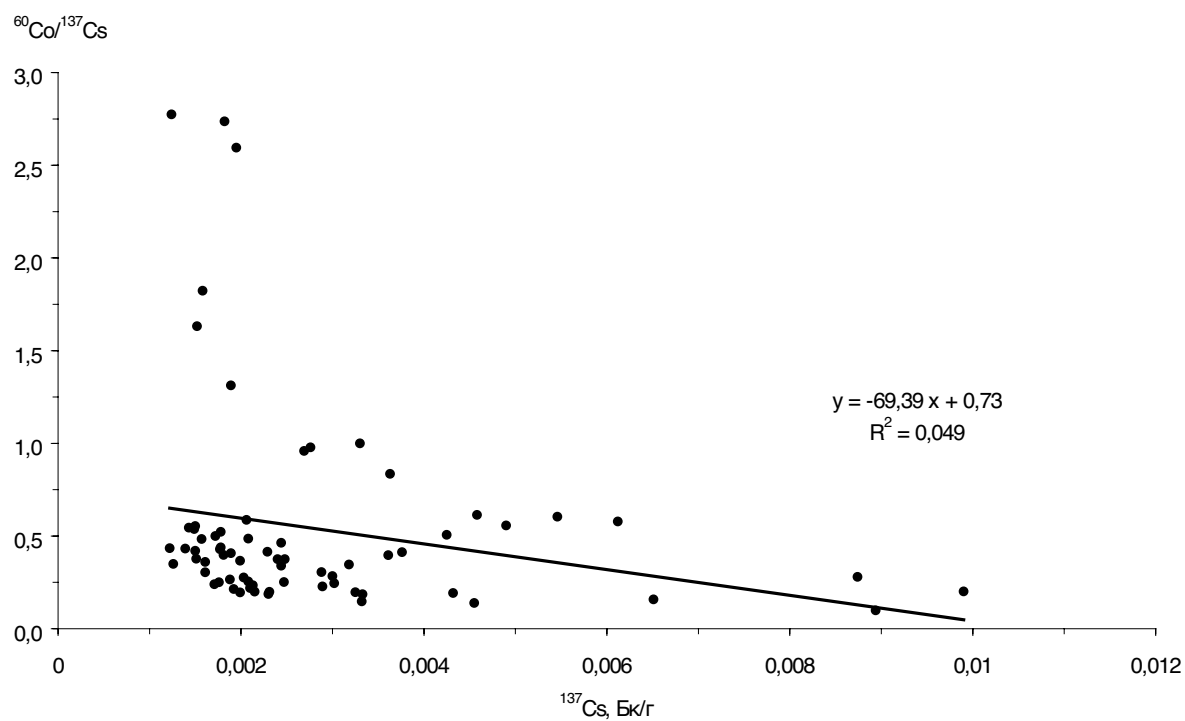


Рис. 4. Поле кореляції «відношення активності нуклідів $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ — питома активність ^{137}Cs »

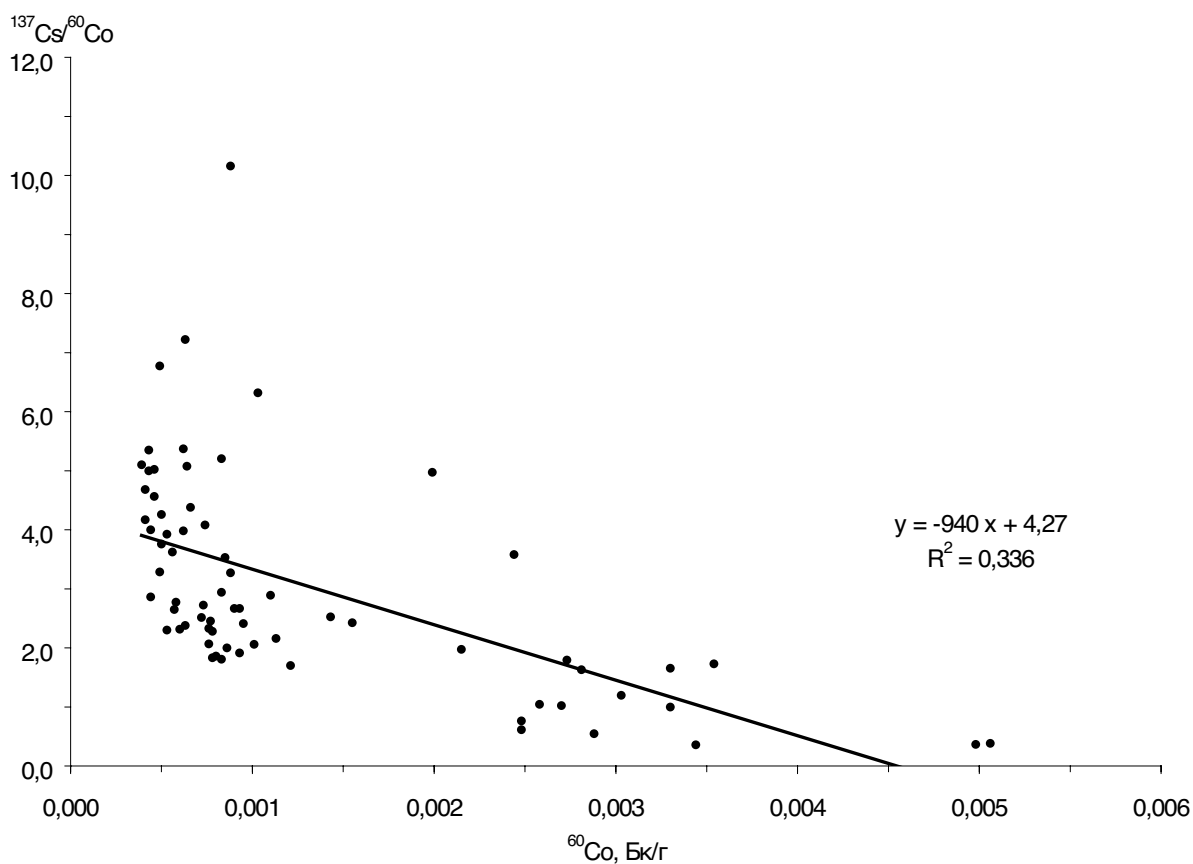


Рис. 5. Поле кореляції «відношення активності нуклідів $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ – питома активність ^{60}Co »

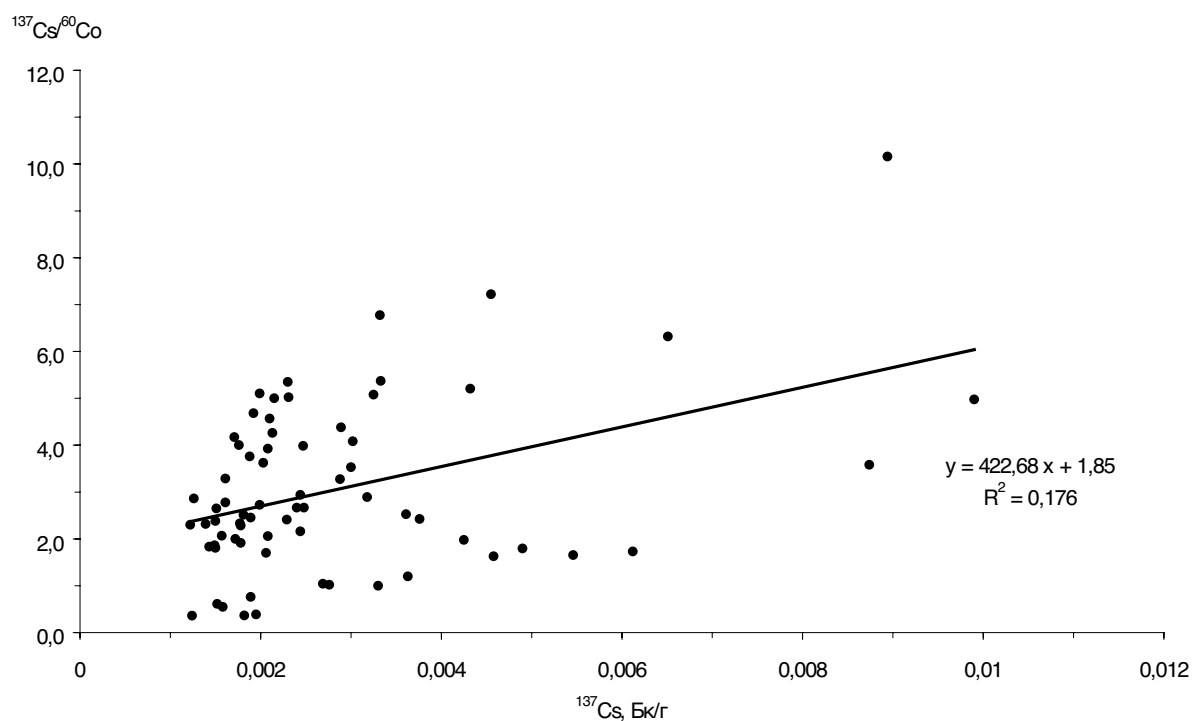


Рис. 6. Поле кореляції «відношення активності нуклідів $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ – питома активність ^{137}Cs »

розподілу в контейнері металобрухту, забрудненого ^{137}Cs та ^{60}Co . Відповідно до алгоритмів, закладених у програмне забезпечення FRM-03, об'єм контейнера було поділено на сектори, для кожного з яких було проведено вимірювання та отримано протокол з даними щодо питомої активності РР та РВВ у металобрухті. Відповідно до настанов [1] висновок щодо звільнення ПРМ від регулюючого контролю робиться на підставі протоколу вимірювань з найбільшими показниками визначеної питомої активності РР та РВВ у металовідходах. Для визначення переліку контейнерів, що належать тільки до однієї групи, можна було б застосувати інший підхід — за критерієм належності

переважної кількості результатів вимірювань до одного з кластерів даних. У роботі такий суб'єктивний підхід не використовувався.

Беручи до уваги той факт, що застосований кластерний аналіз не дав змоги отримати однозначний висновок щодо того, до яких із досліджених контейнерів можна застосувати діючі КМ, а для яких — ні, пошук рішення поставленого завдання було реалізовано в інший спосіб. З цією метою було застосовано критерій відповідності середнього геометричного значення відношення активності РР, розрахованого для контейнера за всіма результатами вимірювань, до довірчого інтервалу КМ (від $SF_{\text{РВВ/РР}} - U_c$ до $SF_{\text{РВВ/РР}} + U_c$).

Таблиця 3. Результати кластеризації даних та оцінки середнього геометричного значення відношення активності нуклідів $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ у металовідходах у полі кореляції з питомою активністю ^{60}Co (^{137}Cs)

Кількість кластерів та їхні номери		Характеристики кластера			Номери контейнерів у кластері
		n	(M ± Δ)	δ, %	
3	1	59	0,320 ± 0,035	11,0	3, 5, 8, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48
	2	7	1,173 ± 0,281	24,0	2, 8
	3	3	2,701 ± 0,107	4,0	2
4	1	45	0,273 ± 0,028	10,3	3, 5, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48
	2	18	0,608 ± 0,083	13,7	2, 3, 8, 27
	3	3	1,574 ± 0,292	18,5	2, 8
	4	3	2,701 ± 0,107	4,0	2

Таблиця 4. Результати вибірки даних та оцінки середнього геометричного значення відношення активності нуклідів $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ у полі кореляції з питомою активністю ^{60}Co (^{137}Cs) у металовідходах

Кількість кластерів та їхні номери		Характеристики кластера			Номери контейнерів у кластері
		n	(M ± Δ)	δ, %	
3	2	42	1,668 ± 0,230	13,77	2, 3, 5, 8, 19, 25, 27
	1	23	4,305 ± 0,357	8,29	5, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48
	3	4	7,487 ± 1,70	22,68	15, 27, 48
4	4	10	0,664 ± 0,197	29,71	2, 8
	2	34	2,276 ± 0,153	6,74	3, 5, 8, 19, 25, 27
	3	21	4,418 ± 0,266	6,02	5, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48
	1	4	7,487 ± 0,17	22,68	15, 27, 48

Таблиця 5. Розподіл контейнерів за групами як результат застосування критерію відповідності

Відношення активності РР	Номер групи контейнерів	Перелік контейнерів у групі
$^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$	1	3, 5, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48
	2	2, 8
$^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$	3	2, 3, 5, 8, 12, 15, 19, 25, 27, 47, 48

Як результат було отримано три групи контейнерів, склад яких відображено в табл. 5. До груп 1 та 3 було включено контейнери, для яких відношення активності РР відповідає висунутому критерію, до групи 2 — ні. У табл. 6 наведено характеристику 95 % довірчого інтервалу оцінки середнього геометричного значення відношення активності РР ($M \pm \Delta$) для кожної групи контейнерів та розподіл окремих результатів вимірювань відносно застосованих границь довірчого інтервалу $SF_{\text{РВВ/РР}}: SF_{\text{Co/Cs}}$ від 0,047 до 0,565; $SF_{\text{Cs/Co}}$ — від 0,5 до 6,02. Індекс «ск» вказує на кількість даних, що відповідають кількості контейнерів у групі.

Як можна бачити з табл. 5, якщо в якості РР обрати ^{137}Cs , середнє геометричне значення відношення $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ знаходиться в межах довірчого інтервалу відповідного $SF_{\text{РВВ/РР}}$ для дев'яти контейнерів (група 1). У той же час, якщо обрати як РР ^{60}Co , усі досліджені контейнери задовольняють умови застосованого критерію відповідності (група 3). При цьому, як можна бачити з табл. 6, лише незначна частина результатів вимірювань вийшла за межі довірчого інтервалу $SF_{\text{РВВ/РР}}$. Це підтверджує прийнятність застосування запропонованого критерію відповідності для визначення переліку контейнерів, для яких може бути застосований діючий РВ.

Таким чином, якщо спиратись на отримані в роботі результати, можна зробити висновок про те, що

застосування до даних вимірювань діючого РВ, побудованого на РР ^{137}Cs , може призвести до отримання, на наш погляд, некоректних розрахункових даних щодо питомої активності РВВ у складі металовідходів для двох контейнерів 2 та 8. За наявними матеріалами, що відображають багаторічний досвід радіологічної характеристики низько- та середньоактивних металевих РМ, утворених внаслідок демонтажу різних конструкцій АЕС, з цією метою найчастіше як РР застосовується ^{60}Co [5, 6]. Лише в тому випадку, коли рівні забруднення РМ цим нуклідом знаходяться нижче мінімально детектованої активності установи, що використовується для радіаційного контролю, виникає необхідність залучення КМ, побудованих на застосуванні РР ^{137}Cs або інших гамма-випромінюючих нуклідів. На наш погляд, для забезпечення гарантій коректності застосування методології РВ для ПРМ, що плануються до звільнення від регулюючого контролю, для партій металобрухту, що були дезактивовані на промисловій установці з абразивоструменевої обробки та завантажені в контейнери 2 та 8, необхідно відібрати зразки, провести додаткові експериментальні дослідження радіонуклідного складу РМ та встановити нові значення КМ. Це дозволить врахувати характеристики радіонуклідного забруднення металобрухту після дезактивації, що не були відомі на етапі встановлення значень КМ РВ ($SF_{\text{РВВ/РР}}$), відображених у табл. 1.

Таблиця 6. Середнє геометричне значення відношення активності $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ або $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ у металовідходах за групами контейнерів та розподіл даних вимірювань відносно до границь довірчого інтервалу значень відповідного коефіцієнта масштабування

Номер групи контейнерів	Кількість даних	$M \pm \Delta$	Розподіл даних відносно до границь довірчого інтервалу значень $SF_{\text{РВВ/РР}}\%$		
			<	В межах	>
1	9ск	$0,285 \pm 0,059$	0	100	0
	57	$0,313 \pm 0,034$	0	96,5	3,5
2	2ск	$1,289 \pm 0,855$	0	0	100
	12	$1,289 \pm 0,464$	0	0	100
3	11ск	$2,64 \pm 0,90$	0	100	0
	57	$2,496 \pm 0,426$	4,3	89,9	5,8

Висновки

Результати дослідження показали, що після дезактивації середнє відношення питомої активності РР у деяких фрагментах металобрухту або в партіях металовідходів у цілому може суттєво відрізнитись від його значення, прийнятого як КМ у діючому РВ, що застосовується для визначення питомої активності РВВ, які не можуть бути виміряні за допомогою методу гамма-спектрометрії.

Кластерний аналіз результатів гамма-спектрометричних вимірювань, проведених за допомогою установки FRM-03, дав змогу розділити вибірку даних на окремі кластери, у межах яких характеристики розподілу питомої активності РР або відношення активності РР значно відрізняються. Але за такого способу, унаслідок попадання в об'єм контейнера фрагментів металобрухту з різними рівнями залишкового після дезактивації радіоактивного забруднення, не всі партії металовідходів можуть бути однозначно віднесені до групи, де відношення активності РР відповідає прийнятому в діючому РР. Вирішення проблеми знайдено шляхом застосування критерію відповідності середнього геометричного значення відношення активності РР, оціненого для контейнера за сумою виконаних вимірювань, границям довірчого інтервалу КМ, що були раніше (у 2019 р.) розраховані в рамках спеціально проведених досліджень і нині використовуються ДСП «Чорнобильська АЕС» із поправкою на радіоактивний розпад.

До партій металовідходів, у складі яких показники розподілу питомої активності РР виходять за межі довірчого інтервалу значень $SF_{РВВ/РР}$ станом на 2024 р., обґрунтоване рішення щодо застосування діючого РВ може бути прийняте лише після його перевірки. Немає гарантії того, що відношення активності РВВ до активності РР у складі таких партій металовідходів відповідає прийнятим значенням $SF_{РВВ/РР}$, що застосовуються. МАГАТЕ рекомендує періодично або систематично проводити верифікацію діючих КМ на підставі додаткових експериментальних досліджень та встановлювати їхні нові значення, що відповідають характеристикам радіонуклідного забруднення матеріалів, які не були відомі на етапі встановлення РВ.

Список використаної літератури

1. НП 306.4.159-2010. Порядок звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю у рамках прак-

тичної діяльності [Затверджено наказом Держатомрегулювання № 84 від 01.07.2010, зареєстровано в М-ві юстиції України 20.08.2010 за № 718/18013]. — Київ, 2010.

2. СОУ НАЕК 260:2022. Забезпечення радіаційної безпеки. Звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю у ДП «НАЕК «Енергоатом» [Погоджено листом Держатомрегулювання № 21-44/8847-7853 від 13.07.2023; лист МОЗ України № 26-04/2705/2-23 від 03.02.2023]. — Київ, 2022. — 252 с.
3. Сапона М. Методологія звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю в дії: доповідь / М. Сапон // Онлайн-семинар «Звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю». — Режим доступу: <https://sstc.ua/news/metodologiya-zvlnennya-radioaktivnih-materialiv-vid-regulyuyuchogo-kontrolyu-v-diyi>.
4. Інструкція з експлуатації стаціонарної установки гамма-спектрометричного контролю FRM-03. — ДСП «Чорнобильська АЕС», 2023. — 63Е-ЦРБ. Інв. № 79 від 08.05.2023. — 49 с.
5. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. — Vienna : IAEA, 2009. — 142 p.
6. Михайлов А. В. Методология применения радионуклидных векторов для характеристики РАО АЭС / А. В. Михайлов, В. А. Краснов, В. Н. Безмылов // Ядерная энергетика та довкілля. — 2018. — № 2 (12). — С. 51–58.
7. СТП 2.035-2018. Система управления производственными процессами. Методика установления радионуклидных векторов для характеристики партий твердых радиоактивных отходов. — Славутич : ГСП «Чернобыльская АЭС», 2018. — 24 с. (редакция 2020 г.)
8. Методика визначення нуклідних векторів для радіоактивних матеріалів ДСП «Чорнобильська АЕС». — Славутич : ДСП «Чорнобильська АЕС», 2019. — 64 с.
9. Звіт про НДР «Обґрунтування переліку радіонуклідів та визначення нуклідного вектора для потоку радіоактивних матеріалів, які направляються на звільнення від регулюючого контролю», № держреєстрації 0119U 000602; Керівник Максименко А. М. — Славутич, 2019. — 278 с.
10. Wagstaff K. Clustering with missing values: no imputation required / K. Wagstaff // Proceedings of the Meeting of the International Federation of Classification Societies. — 2004. — P. 649–658. — doi.org/10.1007/978-3-642-17103-1_61.
11. Chi J. T. k-POD: A method for k-means clustering of missing data / J. T. Chi, E. C. Chi, R. G. Baraniuk // The Amer-

- ican Statistician. — 2016. — Vol. 70, no. 1. — P. 91–99. — doi.org/10.1080/00031305.2015.1086685.
12. Михайлов О. В. Результати порівняльної оцінки алгоритмів розрахунку коефіцієнтів масштабування (scaling factors) для радіонуклідів, що важко вимірюються у відходах ЧАЕС, на прикладі ^{241}Am / О. В. Михайлов // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — Вип. 2 (21). — С. 61–70.
 13. Михайлов О. В. Результати верифікації радіонуклідного вектора для характеристики твердих радіоактивних відходів ЧАЕС, що спрямовуються на захоронення / О. В. Михайлов // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — Вип. 2 (24). — С. 43–53.
 14. Михайлов О. В. Верифікація коефіцієнтів масштабування, призначених для радіологічної характеристики твердих радіоактивних відходів АЕС за методологією МАГАТЕ. Огляд сучасних підходів / О. В. Михайлов, В. М. Безмилов // Ядерна енергетика та довкілля — 2023. — Вип. 1 (26). — С. 24–34.

**O. V. Mykhailov¹, I. S. Skiter¹, O. V. Miasnykov²,
T. V. Tymoshenko²**

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

² State Specialized Enterprise “Chornobyl NPP”, Slavutych,
Kyiv Region, Ukraine, 07101

Study of Specific Activity Distribution of Key Nuclides in Metal Waste Forwarded for Exemption from Regulatory Control in the SSE “Chornobyl NPP”, and Assessment of their Compliance with the Current Radionuclide Vector

The initiation of dismantling activities at the Chornobyl NPP Units has resulted in a significant amount of metal waste, decontamination of which can ensure the reduction of their radioactive contamination to levels that allow their removal outside the Exclusion Zone and return to economic circulation for use in the country's metallurgical industry. To solve the problem of metal waste batches (MWB) exemption from regulatory control, FRM-03 facility (manufactured in the Czech Republic) for gamma-spectrometry control of scrap metal in container was created at the industrial site of the SSE “Chornobyl NPP”. During the experimental and industrial operation of FRM-03, based on the results of measurements of certain MWBs, it was found that the ratio of the activity of

key nuclides (^{137}Cs to ^{60}Co or vice versa) in the deactivated metal differs significantly (to several times), from the scaling factors (SF), which are recommended with others SFs value for MWB radiological characterization using radionuclide vector methodology.

This work aims to analyze the measurement results of specific activity of key nuclides in MWBs from the Chornobyl NPP, obtained using the FRM-03 facility, and to determine under what conditions or by what quantitative criterion the current radionuclide vector can be applied to the waste stream exempted from regulatory control. The objects of the study were the results of measurements of 11 containers with radioactively contaminated scrap metal that underwent radiation control at the FRM-03 facility. Statistical, regression and cluster analysis of data on the specific activity of key nuclides and the ratio of their activity in 11s MWB sent to the SSE “Chornobyl NPP” for exemption from regulatory control was carried out. A quantitative criterion for assessing the MWB compliance to the current radionuclide vector was proposed. It is recommended to compile a list of containers for which the SF value needs to be verified or new values set, corresponding to other characteristics of radioactive contamination of scrap metal that were previously unknown.

Keywords: Chornobyl NPP, metal waste batch, exemption from regulatory control, key nuclides, specific activity, radionuclide vector, scaling factors.

References

1. NP 306.4.159-2010. [Procedure for radioactive materials exemption from regulatory control within the framework of practical activities]. Approved by State Nuclear Regulatory Commission order no. 84, dated 01.07.2010, registered by Ministry of Justice of Ukraine under no. 718/18013, dated 20.09. 2010. (in Ukr.)
2. SOU NNEGC 260:2022. [Ensuring radiation safety. Exemption of radioactive materials from regulatory control at SE “NNEGC ‘Energoatom’”. Agreed by Letter of the State Nuclear Regulatory Commission no. 21-44/8847-7853, dated 13.07.2023; letter of the Ministry of Health of Ukraine no. 26-04/2705/2-23, dated 03.02.2023. Kyiv, 2022, 252 p. (in Ukr.)
3. Methodology for radioactive materials exemption from regulatory control in action. Report by M. Sapon at the online seminar “Radioactive materials exemption from regulatory control”. Available at: <https://sstc.ua/news/metodologiya-zvylnennya-radioaktivnih-materialiv-vid-regulyuyuchogo-kontrolyu-v-diyi>. (in Ukr.)

4. Operating manual for the stationary facility of gamma spectrometric control FRM-03. 63E-RSS. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2023, 49 p. (in Ukr.)
5. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Vienna: IAEA, 2009, 142 p.
6. Mykhailov O. V., Krasnov V. O., Bezmylov V. M. (2018). [Methodology of using radionuclide vectors for characterization of NPP radioactive waste]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 12, no. 2, pp. 51–58. (in Rus.)
7. Production process control system. Methodology for the determination of radionuclide vectors for the characterization of batches of solid radioactive waste. STP 2.035-2018. Slavutych: SSE "ChNPP", 2018, 24 p. (revised 2020). (in Rus.)
8. Methodology for determining nuclide vectors for radioactive materials of the Chornobyl NPP. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2019, 64 p. (in Ukr.)
9. Justification of the list of radionuclides and determination of the nuclide vector for the flow of radioactive materials sent for exemption from regulatory control. Research report. State registration no. 0119U 000602. Head A. M. Maksymenko. Slavutych, 2019, 278 p. (in Ukr.)
10. Wagstaff K. (2004). Clustering with missing values: no imputation required. *Proceedings of the Meeting of the International Federation of Classification Societies*, pp. 649–658, doi.org/10.1007/978-3-642-17103-1_61.
11. IChi J. T., Chi E. C., Baraniuk R. G. (2016). k-POD: A method for k-means clustering of missing data. *The American Statistician*, vol. 70 (1), pp. 91–99, doi.org/10.1080/00031305.2015.1086685.
12. Mykhailov O. V. (2021). [Results of comparative evaluation of algorithms for calculating scaling factors of difficult-to-measure nuclides in ChNPP wastes at ^{241}Am example]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2 (21), pp. 61–70. (in Ukr.)
13. Mykhailov O. V. (2022). [Results of radionuclide vector verification to characterize solid radwaste of Chornobyl Nuclear Power Plant sent for burial]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2 (24), pp. 43–53. (in Ukr.)
14. Mykhailov O. V., Bezmylov V. M. (2023). [Verification of Scaling Factors in Radiological Characterization of NPP Solid Radwaste Using the IAEA Procedure. Overview of Modern Approaches]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (26), pp. 24–34. (in Ukr.)

Надійшла / Received 12.03.2025

Рекомендована до друку / Accepted 19.03.2025