

# УДОСКОНАЛЕННЯ ТА АДАПТАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РІВНІВ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ ПРИ ПЕРОРАЛЬНОМУ ТА ІНГАЛЯЦІЙНОМУ НАДХОДЖЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІЧИЛЬНИКІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛЮДИНИ (ЛВЛ)

**В.О. Пікта, О.М. Первозніков, В.В. Василенко, Г.М. Задорожна**

Інститут радіаційної гігієни та епідеміології (ІРГЕ)  
ДУ „НЦРМ” АМН України, вул. Мельникова, 53, м. Київ, 04050  
e-mail: wbc@i.com.ua

За допомогою експертного ЛВЛ встановлено особливості розподілу інкорпорованих радіонуклідів при інгаляційному та пероральному шляхах надходження в організм людини та визначення їх активності. Удосконалено існуючі методики вимірювання для складних випадків інкорпорації суміші радіонуклідів різних шляхів надходження. На прикладі  $^{60}\text{Co}$  та  $^{137}\text{Cs}$  проведено локалізацію та визначення активності у випадку інкорпорації кількох радіонуклідів.

Вже кілька десятків років як в Україні використовуються технології, що пов'язані з радіоактивним випромінюванням. Використання радіоактивних речовин в промисловості, медицині та інших галузях з часом стає все більш розповсюдженим. Відповідно зростають і вимоги до техніки безпеки, контролю рівнів забруднення, точності вимірювань та своєчасного адекватного реагування на виявлення додаткових джерел опромінення людини [1-3]. Після аварії на ЧАЕС (Чорнобильській атомній електростанції) суттєвий вклад в опромінення людини вносить внутрішнє опромінення [4]. Очевидно, що навіть невеликі рівні вмісту радіонуклідів, що потрапили в організм, можуть спричинити при певних умовах інкорпорації серйозні наслідки для здоров'я людини. Дуже малі відстані до критичних органів і тканин, тривалий час опромінення, геометрія опромінення, що сприяє максимальному ураженню органів – дуже

серйозні фактори, які спонукають до отримання найбільш повної інформації про характер інкорпорації радіонуклідів: якісний та кількісний склад, хімічний склад носія, шлях надходження, час і т.п. Доза внутрішнього опромінення формується за рахунок опромінення організму радіонуклідами, що потрапили до нього. Відомі три шляхи надходження радіонуклідів в організм [5, 6]. По-перше, „харчовий”, пероральний, через шлунково-кишковий тракт (ШКТ) – вживання радіаційно-забруднених продуктів; по-друге, „інгаляційний”, через органи дихання до легенів – при диханні. І третій шлях – шкірний – через можливе поранення і розповсюдження по тілу через кров. Останній шлях надходження – зустрічається досить рідко.

Експертний лічильник випромінювання людини (ЕЛВЛ) (рис. 1) зроблено у вигляді низькофонової захисної камери, в якій розміщено систему детекторів. Захи-

сна камера виготовлена з литих оброблених блоків радіаційно-чистої сталі товщиною 200 мм. Її вага сягає 44 т при зовнішніх розмірах 2400 x 2200 x 2000 мм. Проби металу проходили обов'язковий ретельний гамма-спектрометричний контроль на гамма-спектрометрі експертного класу з напівпровідниковим детектором. За критерій було прийнято вміст цезію-137, калію-40, плутонію-239, америцію-241, марганцю-54, хрому-51, кобальту-60



Рис. 1. Експертний ЛВЛ в момент приготування до вимірів.

Всередині захисної камери знаходяться 4 незалежні спектрометричні вимірювальні системи.

Система гамма-детектування ЕЛВЛ складається з спектрометричної «лінійки» з 6 великих низькофонових блоків детектування на основі монокристалів NaI(Tl) розміром  $\varnothing 150 \times 100$  мм.

Дослідження відбувається в геометрії «лежачи на спині» – пацієнт лежить на ліжку, під яким розміщені блоки детектування на однаковій відстані один від одного так, що загальна довжина «лінійки» складає 175 см, а перший блок знаходиться під головою пацієнта.

Сканер дає можливість переміщувати блок детектування уздовж тіла людини на відстань 160 см, поперек – на відстань 40 см, що дозволяє реєструвати зосередження радіонуклідів в тих чи інших органах людини, а також місце знаходження «гарячих часток».

та інших елементів техногенного та природного походження нижче МДА контролюючого спектрометра (0,1 Бк) при тривалості вимірювання протягом доби.

Камера забезпечує зниження радіаційного фону: у вікні  $^{137}\text{Cs}$  - 75,5, у вікні  $^{40}\text{K}$  - 69,0, у вікні  $^{232}\text{Th}$  - 14,3 раз. Інтегральне пониження фону - близько 100. Це дає змогу досягти надвисокої чутливості – 20 Бк за 10 хв. для  $^{137}\text{Cs}$ .



Рис. 2. Скануючий пристрій.

Бета-лічильник складається з двох блоків детектування бета-випромінювання людини. Основу блоків детектування складають детектори, виготовлені з полістиролу  $\varnothing 40 \times 8$  мм та  $\varnothing 49 \times 2$  мм. Їх енергетична спроможність, відповідно, 15,5 % та 16,9 %.

Спектрометр низькоенергетичного гамма-випромінювання на основі фосфіт-детекторів дозволяє визначити альфа-активні радіонукліди по супроводжувачому гамма- або рентген-випромінюванню. Ефективність реєстрації детекторів відповідно 14,4 % та 19,6 %.

Основні технічні параметри експертного ЛВЛ НЦРМ надано у таблиці 1.

Для роботи спектрометричних трактив використані електронні блоки виробництва фірм "ORTEC", "CANBERRA", "SILENA", аналізатор фірми "CANBERRA" та блоки вітчизняного виробництва.

Скануючий пристрій (рис. 2) обладнано механічним приводом, що дозволяє дистанційно за допомогою комп'ютера керувати його рухом в горизонтальній площині. Висота сканера над поверхнею тіла людини встановлюється заздалегідь ручним способом, враховуючи конституцію пацієнта. Це зроблено з метою уникнути травмування пацієнта через можливі збої в роботі устаткування або через помилки оператора. Оптомеханічний привід

дозволяє розмістити детектор над тілом людини з точністю 1 см відносно осі OX та OY. Детектор сканера на основі кристала NaI(Tl), розміром 210x140x70 мм колімований свинцевими пластинами товщиною 2 см. В апаратурі сполучення зі сканером використані 1024 каналний АЦП (аналого-цифровий перетворювач), підсилювач, високовольтний блок фірми Silena (Італія).

Таблиця 1. Основні технічні параметри експертного ЛВЛ НЦРМ у захисній камері

Маса сталевого захисту, т	44,0
Габарити, м	2,4 x 2,2 x 2,0
Переріз квадратних брусів (товщина стіни), мм	200,0
Кратність ослаблення захисту по $^{137}\text{Cs}$ , разів	106
Кратність ослаблення захисту від 0 до 2,0 MeV, разів	160
<i>Детектори:</i>	
а) “лінійка” з 6 блоків – роздільна здатність по $^{137}\text{Cs}$ , %	9,5
МДА при t = 10 хв, Бк	20
б) “сканер” сцинтил. детектора, роздільна здатність по $^{137}\text{Cs}$ , %	6,5
МДА при t = 5 хв, Бк	51
в) легеневі фосвічі, ефективність по $^{241}\text{Am}$ , %	9,3
МДА для $^{241}\text{Am}$ , при t = 30 хв, Бк	25-50
г) бета-детектори, роздільна здатність по E = 0,624 MeV, %	15,5
МДА для випромінювання з E = 2,25 MeV при t = 60 хв, Бк	400-600

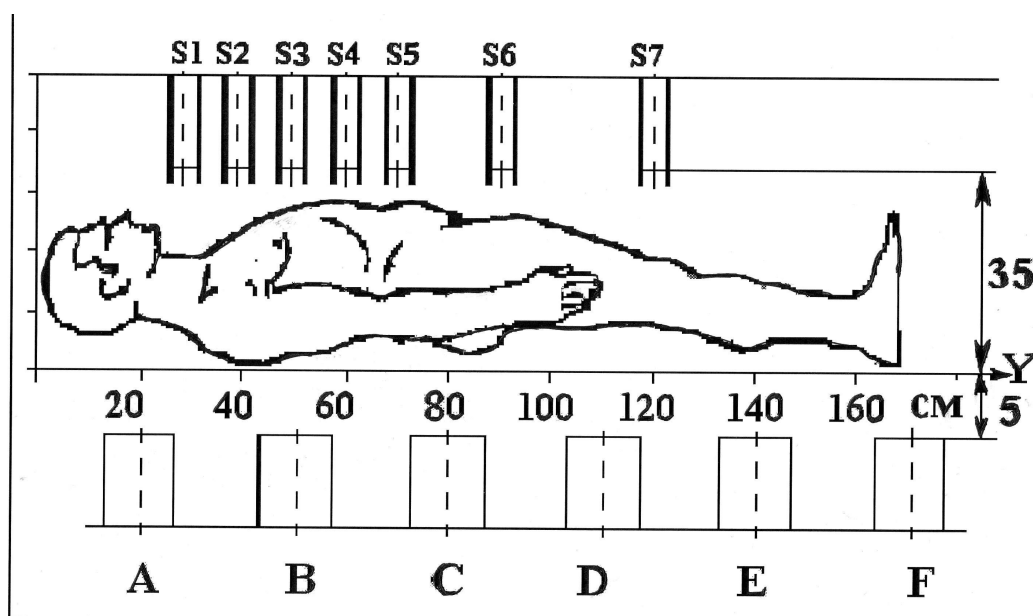


Рис. 3. Схематичне розташування спектрометричної „лінійки” та сканера в точках набору спектра.

Розроблене в лабораторії ЛВЛ програмно-методичне забезпечення Silbody7.02 має всі необхідні операції для управління роботою сканера. Цей програмний пакет передбачає управління сканером як в ручному режимі, коли натискання клавіші призводить до руху сканера на певну відстань в певному напрямку, або вмикає/вимикає набір спектру, так і в автоматичному режимі, коли програмно задається шлях (траєкторія) руху сканера, зупинки, час зупинок, швидкість руху, кількість необхідних спектрів, час набору кожного зі спектрів. Набір спектра може здійснюватись незалежно від руху сканера. Всі задані маршрути руху сканера можуть бути збережені в окремих файлах та при необхідності можуть завантажуватись в пам'ять комп'ютера, що звільняє оператора від необхідності кожного разу перед вимірами програмувати вже визначений маршрут руху. Програмне забезпечення дозволяє одночасне вимірювання сканером та спектрометричною "лінійкою" з 6 сцинтиляційних детекторів на основі кристала NaI(Tl). На рис. 3, наведено простий шлях сканера над тілом

людини з 7 зупинками по 600 та 300 секунд та набором спектру. При необхідності щільність точок набору спектрів можна збільшити, тоді картину розподілу радіонукліду можна отримати більш детально. На рис. 4 зображено результати сканування пацієнта скануючим пристроєм з дискретністю 1 - 5 см, у якого виявлено інкорпорацію  $^{137}\text{Cs}$  нерозчинних форм ("гаряча частка"), що локалізується у верхній частині легень, імовірно, в трахеобронхіальних вузлах. На рис. 5 зображено результати обстеження того ж самого пацієнта, отримані при скануванні на спектрометричній "лінійці".

При цьому слід зазначити, що оскільки ефективність колімованого детектора сканера порівняно з широким детектором „лінійки” невелика, а отже час набору спектра значно більший, то дуже ретельні виміри доцільно проводити маючи первинну інформацію про наявність та приблизне розташування радіонукліда. В даному випадку вимірювання на „спектрометричній” лінійці надає цю інформацію для подальшого сканування та локалізації „гарячої частки” в тілі пацієнта.

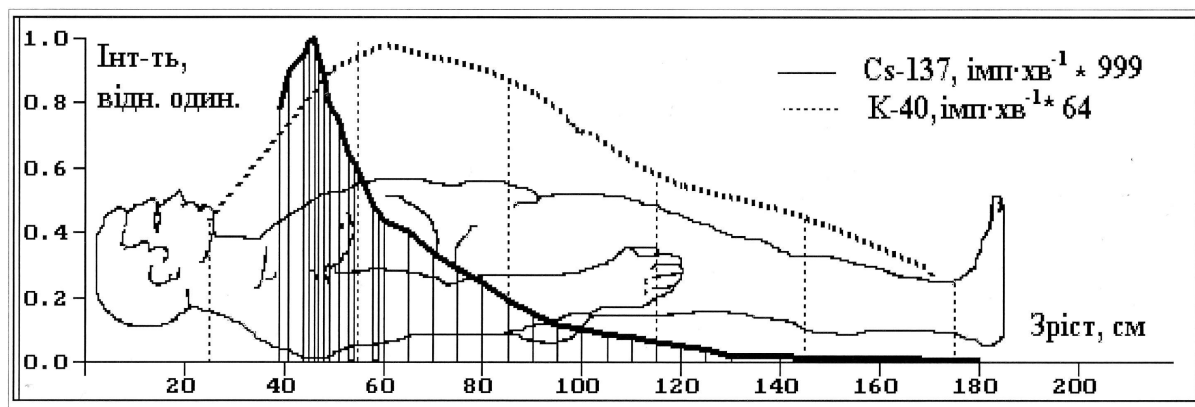


Рис. 4. Розподіл інкорпорованих в організмі людини радіонуклідів, отриманий при скануванні скануючим пристроєм з дискретністю 1, 3 - 5 см.

У випадку, коли за допомогою спектрометричної „лінійки” та механічного сканера визначено, що радіонуклід має точкову локалізацію, і відомі його двовимірні координати, важливо встановити

його глибину залягання в тілі людини. Частіше за все зустрічаються випадки надходження нерозчинних форм паливної матриці у вигляді «гарячих часток» у «свідків» аварії (персонал ЧАЕС, що пра-

цював у нічну зміну 26 квітня 1986 року) та ліквідатори наслідків аварії на ЧАЕС, що були задіяні у перші дні аварії. У пер-

соналу АЕС (переважно працівників реакторних відділів) зустрічаються накопичення  $^{60}\text{Co}$ , точкової локалізації.

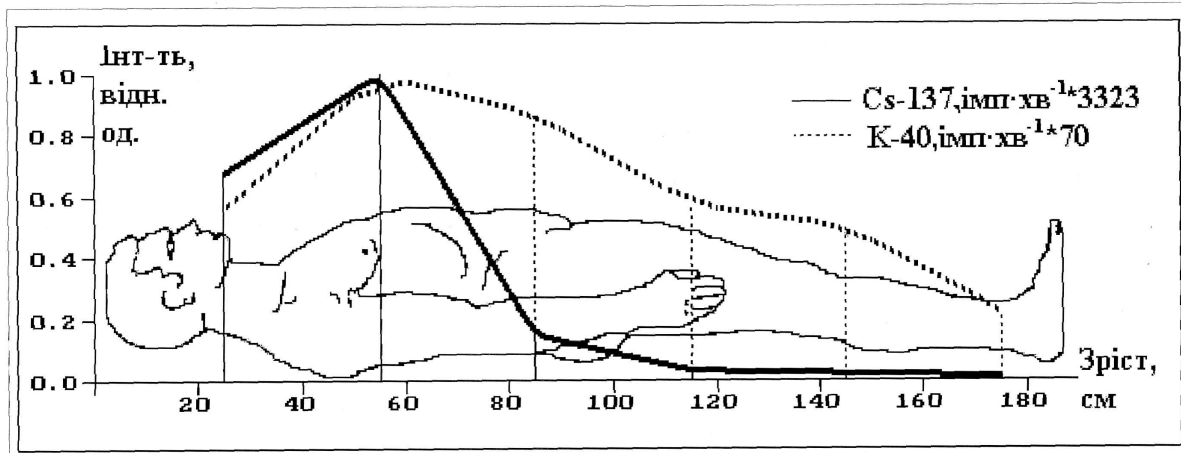


Рис. 5. Розподіл інкорпорованих в організмі людини радіонуклідів, отриманий на спектрометричній “лінійці” („аномальний” розподіл  $^{137}\text{Cs}$ ).

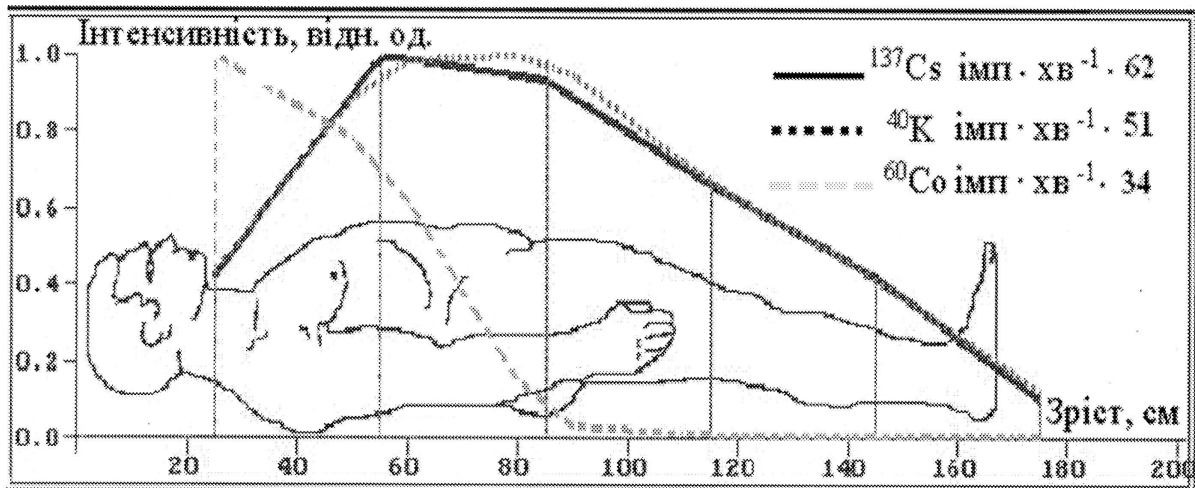


Рис. 6. Розподіл радіонуклідів в організмі людини, що надійшли інгаляційним  $^{60}\text{Co}$ , та пероральним  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{40}\text{K}$  шляхами („нормальний” розподіл  $^{137}\text{Cs}$ )

Шляхом експериментального моделювання на фантомі торсу людини, що складається з поліетиленових блоків у вигляді цеглин, густина матеріалу ( $0,9 \text{ г/см}^3$ ) яких наближена до густини тіла людини і які відповідно мають еквівалентні поглинаючі властивості гамма-випромінювання, для кожного конкретного випадку визначається глибина залягання частки, її спектральний склад та активність. Для цього аналізується відношення швидкості

відліку імпульсів в детекторі В до швидкості відліку імпульсів в кожному іншому детекторі спектрометричної “лінійки”  $N_2/N_i$ ,  $i=1\div 6$  (для  $i=2$  це співвідношення, природно, буде рівним одиниці) та порівнюють його з аналогічними співвідношеннями, отриманими зі спектрів пацієнта. Експериментальне моделювання показує, що у багатьох випадках глибина залягання частинок 3-9 см від поверхні спини.

При сприятливих умовах можливо сканування пацієнта як у положенні лежачи на животі, так і на спині. В окремих випадках може бути доцільним вимірювання в положенні, коли пацієнт лежить на правому або лівому боці. Це підвищує інформативність даних про глибину залягання джерела у тілі пацієнта. Але слід зауважити, що такі вимірювання вимагають тривалого часу (до 2 годин, в залежності від інтенсивності, геометрії джерела, місцезнаходження, тощо).

Традиційно вимірювання на спектрометричній „лінійці” тривають 20 хвилин. Цього часу достатньо, щоб визначити наявність або відсутність „аномального” розподілу  $^{137}\text{Cs}$  (зумовленого „інгаляційною” компонентою, на відміну від „нормального”, зумовленого „пероральною” компонентою, рис. 5, 6) та необхідність подальшої локалізації за допомогою сканера. У переважній частині пацієнтів інкорпоровані радіонукліди інгаляційного походження найбільш ефективно реєструються детектором В, оскільки він ближче ніж інші детектори розташований до дихального тракту пацієнта. Для побудови більш ретельної картини розподілу радіонуклідів за допомогою сканера обирається певний крок дискретності (наприклад 2-3 см) та час експозиції в одній точці (приблизно 5 хвилин). За 20 хвилин вимірів „спектрометричною лінійкою” за допомогою одночасного вимірювання сканером можна отримати додатково темп ліку в 4 точках у зоні поблизу детектора В, щоб зекономити час та скласти більш оптимізований шлях пошуку місцезнаходження „гарячої частки”. При активності частки з вмістом  $^{137}\text{Cs}$  в кілька сот Бк висновок про аномальний розподіл радіонукліда можна зробити вже через кілька хвилин (а отже і запустити сканер), достатньо лише візуально порівняти темп ліку детекторів А, В, С від радіонукліду на аналізаторі імпульсів. Втім, для безумовного ствердження про наявність аномального розподілу у випадку інкорпорованого  $^{137}\text{Cs}$  потрібно проаналізувати співвідношення темпів ліку  $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$  для

кожного з детекторів „лінійки”. При цьому потрібно також впевнитись, що протягом останніх 2-3 годин перед вимірами не було ніяких пероральних надходжень радіонуклідів до організму, щоб розподіл  $^{137}\text{Cs}$  можна було вважати рівномірно розподіленим по м'язовій тканині [4].

Серії вимірювань показують, що характер просторового розподілу радіонуклідів в об'ємі дихального тракту пацієнтів досить різноманітний. Зустрічаються випадки, коли джерело випромінювання можна вважати точковим, рівномірним або нерівномірно розподіленим.

Для першого випадку в лабораторії ЛВЛ вже розроблена методика визначення глибини залягання джерела в організмі та розрахунку активності [7]. Ця методика дозволяє відокремити якісно та кількісно інгаляційну та пероральну компоненту інкорпорованого  $^{137}\text{Cs}$ . Однак, трапляються випадки, коли поряд з  $^{137}\text{Cs}$  „перорального” походження в організм людини потрапляють інші радіонукліди. Наприклад, „інгаляційний”  $^{60}\text{Co}$ , що неодноразово спостерігався у працівників АЕС, які були задіяні на роботах у реакторних відділеннях - слюсарів-ремонтників, зварювальників та інших. Складність оцінки активності в цьому випадку полягає в тому, що необхідно вирахувати вклади більш високоенергетичних радіонуклідів з енергетичних інтервалів радіонуклідів з меншою енергією та виконати декомпозицію спектру, оскільки в енергетичному вікні, виділеному для одного радіонукліда, є певна частина імпульсів від інших. Наприклад, якщо вимірюється  $^{40}\text{K}$  (1461 кеВ), то при наявності  $^{60}\text{Co}$  (1332 кеВ) частина імпульсів  $^{60}\text{Co}$  потрапить у енергетичне вікно  $^{40}\text{K}$ . Певна кількість імпульсів  $^{60}\text{Co}$  потрапить і в енергетичне вікно  $^{137}\text{Cs}$ . У такому випадку, очевидно, рівні  $^{40}\text{K}$  та  $^{137}\text{Cs}$  будуть завищені. У випадку, коли  $^{60}\text{Co}$  локалізований у верхній частині тулуба, можна розрахувати значення інтенсивності відліку (а отже і активність) для  $^{40}\text{K}$  та  $^{137}\text{Cs}$ . В таких випадках, як правило,  $^{60}\text{Co}$  реєструється лише в перших трьох детекторах А, В, С спектрометричної лінійки.

Тому активності  $^{40}\text{K}$ , розраховані окремо детекторами D, E, F, близькі до істинного значення. Як опорне значення можна використати теоретичне значення активності  $^{40}\text{K}$ , притаманне пацієнтам певної статі, ваги та віку [5]. Тому, прийнявши усереднене значення активності  $^{40}\text{K}$  по детекторам D, E, F та розділивши його на відповідні калібрувальні коефіцієнти детекторів A, B, C, можна отримати „чистий” відлік  $^{40}\text{K}$  на перших трьох детекторах. Отже, залишкова частина імпульсів припадає на  $^{60}\text{Co}$ .

Отже, вміст інкорпорованого  $^{40}\text{K}$ :

$$A^{40K} = \frac{A_D^{40K} + A_E^{40K} + A_F^{40K}}{3}, \quad (2.6)$$

де  $A_{D,E,F}^{40K}$  - активність інкорпорованого  $^{40}\text{K}$ , визначеного каналом детектора D, E, F. Тоді при відсутності  $^{60}\text{Co}$  детектори A, B, C мали б реєструвати вміст рівний  $A^{40K}$ :

$$A_{A,B,C}^{40K} = A^{40K}, \quad (2.7)$$

І, відповідно, можна вирахувати кількість імпульсів в енергетичному вікні  $^{40}\text{K}$ , що обумовлені саме інкорпорованим радіокалієм для кожного детектора:

$$N_{A,B,C}^{40K} = A^{40K} / (K_{BF}^{40K} \cdot M) \quad (2.8)$$

де  $N_{A,B,C}^{40K}$  – швидкість рахунку імпульсів в енергетичному вікні  $^{40}\text{K}$  для кожного детектора A, B, C, що обумовлені саме інкорпорованим радіокалієм;  $K_{BF}$  - „коефіцієнт вагової групи” - калібрувальний коефіцієнт для інкорпорованого  $^{40}\text{K}$ ;  $M$  – маса пацієнта.

Швидкість рахунку імпульсів, обумовлених інкорпорованим  $^{60}\text{Co}$ , в енергетичному інтервалі  $^{40}\text{K}$  становить:

$$N_{A,B,C}^{60Co} = N - N_{A,B,C}^{40K} \quad (2.9)$$

Вміст інкорпорованого в легені  $^{60}\text{Co}$  становить:

$$A_{A,B,C}^{60Co} = N_{A,B,C}^{60Co} \cdot K_{инг}^{60Co} \cdot M \quad (2.10)$$

де  $K_{инг}^{60Co}$  – калібрувальний коефіцієнт для  $^{60}\text{Co}$ , що надійшов в організм інгаляційним шляхом.

Аналогічно, прийнявши усереднене значення активності  $^{137}\text{Cs}$  по детекторам D, E, F, вирахувавши та розділивши на калібрувальні коефіцієнти детекторів A, B, C, можна отримати „чистий” відлік  $^{137}\text{Cs}$ . „Чисті” значення темпів ліку  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{60}\text{Co}$  кожного з детекторів можна використати для побудови розподілу цих радіонуклідів в організмі людини (рис. 6).

Таблиця 2. Скоректований розподіл темпу ліку радіонуклідів у випадку складної інкорпорації при різних шляхах надходження

	Темп ліку, імп·хв <sup>-1</sup>				
	виміряна		Перерахована		
	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
<b>A</b>	73	51	24	16	49
<b>B</b>	94	75	64	38	30
<b>C</b>	58	47	55	35	3
<b>D</b>	34	24	34	24	-

У таблиці 2 наведено протокол розрахунку “чистої” швидкості рахунку у випадку складної інкорпорації при різних

шляхах надходження радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{40}\text{K}$  – пероральним шляхом,  $^{60}\text{Co}$  – інгаляційним.

### Висновки

Враховуючи різноманітний і непростий механізм надходження та розповсюдження радіонуклідів в організмі, різний хімічний склад, ступінь розчинності інкорпорованих форм, досить непросто побудувати універсальну методику визначення активності та розрахунку доз. Якщо для випадків перорального надходження розчинних форм  $^{137}\text{Cs}$  розроблене методичне забезпечення спирається на результати понад кілька десятків тисяч вимірювань, то випадків інгаляційного надходження нерозчинних форм  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  і т. п. лише кілька десятків. Зараз триває робота щодо класифікації цих випадків та пошуку загальних особливостей (наприклад, типового розподілу, зв'язку з антропо-

метричними характеристиками). Вимірювання на експертному ЛВЛ чудово ілюструють переваги багатодетекторних систем. Адже завдяки цій особливості стало можливим не лише реєструвати радіонукліди, а й вказати механізм надходження – інгаляційний чи пероральний, і більш того, розрахувати окремо вклад вмісту радіонукліду в обох випадках у загальну активність. Вдале поєднання переваг різних детекторів, підвищення ефективності вимірювань технічними та аналітичними засобами створює умови для вдосконалення існуючих та розробки нових методик оцінки рівнів внутрішнього опромінення людини.

### Література

1. Дозиметрический контроль внутреннего облучения. Т. 5. Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятии / В.И. Попов, В.П. Крючков, Ю.С. Степанов и др. – М., 2005. – 151с.
2. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта “Укрытие” в 2005 г. /Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский, А.К., Дубенко П.Н., Рыбалка, В.А.Краснов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля – 2006. . - Випуск 6. – С.85-94.
3. Бончук Ю.В., Ратия Г.Г. Проблемы организации дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала на объекте “Укрытие”: // Міжнар. науково-практична конференція “Епідеміологія медичних наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. 20 років по тому”. Тези доповідей. – Донецьк: Вебер. - 2007. - С. 19 - 20.
4. Перевозников О.Н., Ключников А.А., Канченко В.А. Индивидуальная дозиметрия при радиационных авариях. – Ч.: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2007. – С. 92-197.
5. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 262 с.
6. Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides // Safety Reports Series.- IAEA, Vienna. - 2004. - N 37. – 115 p.
7. Перевозніков О.М., Василенко В.В., Литвинець Л.О., Яковлева Г.М., Пікта В.О. Комплексний радіаційний моніторинг із застосуванням системи ЛВЛ. Український журнал медичної техніки та технології. - №3-4, - К., - 2000, С. 38-42.



## **DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF INTERNAL IRRADIATION LEVEL ASSESSMENT METHODS FOR CONTAMINATION BY INGESTION AND INHALATION USING WHOLE BODY COUNTER (WBC)**

**V.O. Pikta, O.M. Perevoznikov, V.V. Vasylenko, G.M. Zadorozhna**

Radiation hygiene and epidemiology institute (RHEI), State administration  
“RCRM” Acad.of Med. Sci. of Ukr Melnikova str., 53, Kyiv, 04050  
e-mail: [wbc@i.com.ua](mailto:wbc@i.com.ua)

With the help of an expert WBC, the distribution of incorporated radionuclides inside human body in the case of intake by ingestion and inhalation is determined as well as their activity were. The measurement methods for complicated cases of incorporated radionuclide mixtures at different types of intake was improved. The example with  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  demonstrates how to locate radionuclides and estimate their activity in the case of intake of several radionuclides.

