

РОЗРОБКА ЕКСПРЕС-МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ДОЗ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЩУРІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КАМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

А. І. Липська¹, І. П. Дрозд²

¹Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. С. Кавецького НАН України, Київ

²Інститут проблем національної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України, Київ

На основі теоретичного та власного експериментального матеріалу запропоновано експрес-методику для розрахунку доз внутрішнього опромінення лабораторних щурів із використанням багатокамерної дозиметричної моделі метаболізму стронцію. Розроблена експрес-методика дозволяє суттєво спростити трудомісткий процес розрахунку поглинутих доз внутрішнього опромінення за тривалого надходження радіонуклідів $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ до організму лабораторних щурів.

Аварія на Чорнобильській АЕС призвела до потужного викиду в навколишнє середовище великої кількості радіонуклідів, напрацьованих у реакторі, що спричинило радіоактивне забруднення значних територій України, Білорусі та Росії. Особливість радіоактивного забруднення чорнобильського походження полягає в тому, що до його складу у великій кількості входять ізотопи з великим періодом напіврозпаду, зокрема цезію, стронцію та трансуранових елементів, які активно включаються в процеси метаболізму. На даний час основну частку ефективної дози опромінення (до 80 - 90 %) населення, яке проживає на радіаційно забруднених територіях, отримує за рахунок внутрішнього опромінення, тобто за рахунок радіонуклідів, що надходять до організму з продуктами харчування [1, 2]. Тому для з'ясування механізмів формування біологічних ефектів та оцінки розвитку віддалених наслідків залишається актуальним проведення модельних експериментів на лабораторних тваринах з чітко визначеним дозовим навантаженням. Особливо важливим є розрахунок доз, що формуються внаслідок внутрішнього надходження радіонуклідів до організму. Об'єктивну інтерпретацію виявлених радіобіологічних ефектів можна дати лише за умов коректної дозиметрії.

Відомо, що формування доз внутрішнього опромінення визначається, головним чином, особливостями кінетики інкорпорованих радіонуклідів в органах і тканинах тварин. На сьогодні дози опромінення дрібних лабораторних тварин визначаються за спрощеною моделлю: організм тварини чи якогось одного критичного органа розглядається як певне гомогенне середовище, куди одноразово чи хронічно потрапляє радіонуклід, що виводиться за експонентним законом із певним періодом напіввиведення [3, 4]. Таке спрощення спричинює досить велику похибку, яка, як показує практика, в окремих випадках може сягати $\pm 50\%$. Водночас упродовж остан-

ніх десятиріч відбулися якісні зміни в розрахунковій дозиметрії внутрішнього опромінення – перехід на вік-залежні багатокамерні моделі [5 - 7]. Це дало змогу враховувати такі особливості кінетики радіонуклідів, як повторне всмоктування в нижніх відділах кишечника й надало можливість з великою точністю визначати загальну кількість розпадів радіонукліда в будь-якій камері (органі чи тканині організму) та за будь-який термін, що сприяє значному підвищенню точності при розрахунках доз. Однак застосування теорії камерних моделей потребує розв'язування системи диференціальних рівнянь, що являє собою досить складну обчислювальну задачу і вимагає застосування пакета прикладних комп'ютерних програм та спеціальної підготовки дослідника. Тому далеко не кожен фахівець може використовувати на практиці теорію камерних моделей для розрахунку доз.

Мета роботи - розробка методики експресного визначення поглинутих та ефективних доз за хронічного надходження $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ до організму лабораторних щурів.

Поглинута доза в будь-якому органі за внутрішнього опромінення в загальному вигляді визначається як добуток сумарної кількості розпадів радіоактивної речовини в даному органі на ефективну енергію радіонукліда для даного органа, поділений на масу органа за час опромінення [8]:

$$D[\text{Гр}] = 1,6 \cdot 10^{13} \cdot N_t \cdot E_{\text{ef}} / m, \quad (1)$$

де $k = 1,6 \cdot 10^{13}$ Дж/МеВ; N_t - кількість розпадів радіонукліда, що міститься в депо, на час визначення дози, розп.; E_{ef} - ефективна енергія радіонукліда для даного органа з урахуванням біологічної ефективності випромінювання, МеВ/розп.

Отже, для розрахунку поглинутої дози в будь-якому органі (депо) за внутрішнього надходження радіонуклідів необхідно знати:

сумарну кількість розпадів радіонукліда, N_t ;
середньоінтегральну масу органа, m ;
ефективну енергію, E_{ef} .

Застосування багатокamerних моделей дає змогу з великою точністю визначити загальну кількість розпадів радіонукліда в будь-якій камері (органі, тканині) за будь-який термін. На основі теоретичних розробок і власних експериментальних досліджень по вивченню кінетики обміну стронцію за тривалого та одноразового надходження до організму нами було запропоновано структурну схему 11-камерної моделі метаболізму стронцію в організмі лабораторних щурів [9 - 11], де організм тварин представлено сукупністю взаємозв'язаних окремих камер, що являють собою органи й тканини. Баланс радіонуклідів, згідно із запропонованою моделлю, добре описується системою диференційних рівнянь першого порядку. За допомогою пакета прикладних програм Maple 6, використовуючи експериментальні дані, у результаті розв'язку системи диференційних рівнянь ми отримали значення констант переходу між органами і тканинами (так званих біокінетичних констант), а також визначили загальну кількість розпадів у камерах за будь-який термін спостереження. Усі ці розрахунки є базо-

вими для подальшого визначення доз внутрішнього опромінення.

Значення ефективної енергії як для всього тіла, так і окремих органів дорівнює 1,09 МеВ/розн. [8].

Маса тіла тварин не є сталою величиною і може суттєво змінюватись упродовж тривалого експерименту, тому для визначення поглинутої дози слід використовувати (середньоінтегральну) масу, яка дорівнює інтегралу маси за час опромінення, поділеному на цей час:

$$\bar{M} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} m(t)dt}{t_2 - t_1}. \tag{2}$$

У результаті багаторічних експериментальних досліджень, виконаних із використанням лабораторних тварин (щурів), ми отримали великий масив даних стосовно до динаміки вікових змін маси тіла та окремих органів [10].

Зробивши необхідні розрахунки, ми склали таблицю, за якою, знаючи масу тіла на початок експерименту та на момент розрахунку дози, легко визначити її (середньоінтегральну) масу (табл. 1).

Таблиця 1. Значення середньоінтегральної маси лабораторних щурів залежно від початкової та кінцевої маси тіла

	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	...										
80	85,2	90,3	95,7	101,0	106,4	112,0	117,7	123,4	129,3	135,3	141,4	147,5	153,8	160,2	166,7	173,2	179,8	186,6	193,4	200,4	207,3	...										
	90,0	95,0	100,3	105,4	110,8	116,3	121,9	127,5	133,3	139,2	145,2	151,2	157,4	163,7	170,1	176,5	183,1	189,7	196,4	203,4	210,2	...										
		100,0	105,1	110,2	115,4	120,8	126,3	131,8	137,5	143,3	149,2	155,1	161,2	167,4	173,7	180,0	186,5	193,0	199,7	206,5	213,3	...										
			110,0	115,1	120,2	125,5	130,9	136,3	141,9	147,6	153,4	159,2	165,2	171,3	177,5	183,7	190,1	196,5	203,1	209,8	216,5	...										
				120,0	125,0	130,2	135,5	140,8	146,3	151,9	157,5	163,3	169,2	175,2	181,3	187,4	193,7	200,0	206,5	213,1	219,7	...										
					130,0	135,0	140,2	145,4	150,8	156,3	161,9	167,5	173,3	179,2	185,2	191,2	197,4	203,6	210,0	216,5	223,0	...										
						140,0	145,1	150,2	155,5	160,8	166,3	171,8	177,5	183,3	189,2	195,2	201,2	207,4	213,6	220,1	226,5	...										
							150,0	155,1	160,3	165,5	170,9	176,3	181,9	187,6	193,4	199,2	205,2	211,3	217,4	223,8	230,1	...										
								160,0	165,1	170,2	175,5	180,8	186,3	191,9	197,6	203,3	209,2	215,1	221,2	227,5	233,7	...										
									170,0	175,1	180,2	185,5	190,9	196,3	201,9	207,5	213,3	219,2	225,1	231,3	237,4	...										
										180,0	185,1	190,2	195,5	200,8	206,3	211,9	217,6	223,3	229,2	235,2	241,2	...										
											190,0	195,1	200,2	205,5	210,9	216,3	221,9	227,6	233,3	239,3	245,2	...										
												200,0	205,0	210,2	215,5	220,8	226,3	231,8	237,5	243,3	249,2	...										
													210,0	215,1	220,3	225,5	230,9	236,3	241,9	247,6	253,3	...										
														220,0	225,1	230,2	235,5	240,8	246,3	251,9	257,5	...										
															230,0	235,1	240,3	245,5	250,8	256,4	261,9	...										
																240,0	245,1	250,2	255,4	260,9	266,3	...										
																	250,0	255,1	260,2	265,5	270,8	...										
																		260,0	265,0	270,3	275,5	...										
																			270,0	275,1	280,2	...										
																				280,0	285,1	...										
																					290,0	...										
																						300,0	...									
																							310,0	...								
																								320,0	...							
																									330,0	...						
																										340,0	...					
																											350,0	...				
																												360,0	...			
																													370,0	...		
																														380,0	...	
																															390,0	...
																															400,0	...
																															410,0	...
																															420,0	...
																															430,0	...
																															440,0	...
																															450,0	...
																															460,0	...
																															470,0	...
																															480,0	...
																															490,0	...
																															500,0	...

Жирним шрифтом виділено: по діагоналі – маса тварини на початок надходження радіонукліда до організму, г; по горизонталі – маса тварини на момент визначення дози, г.

За експериментальними даними, використовуючи пакет прикладних програм Microsoft Excel 2003, виконували математичну інтерпретацію отриманих залежностей маси органів від маси тіла (табл. 2).

Таблиця 2. Залежність маси органів і тканин лабораторних щурів від маси тіла*

Орган чи тканина	Вирази, що описують залежність органів та тканин (m) від маси тіла (M)
М'язи	$m = - 8 \cdot 10^{-6} M^3 + 0,00697 \cdot M^2 - 1,3708 \cdot M + 128,79$
Скелет	$m = 19,5 [1,28 \cdot \exp(0,0052 M)]$
Печінка	$m = 8,5 \cdot 10^{-7} M^3 - 0,0007 \cdot M^2 + 0,204 \cdot M - 10,3$
Нирки	$m = 0,0064 \cdot M + 0,3231$
Легені	$m = 0,0048 \cdot M + 0,4606$
Селезінка	$m = 0,0019 \cdot M + 0,3834$
Сім'яники	$m = 4 \cdot 10^{-5} M^2 - 0,012 \cdot M + 3,6723$
Шлунок	$m = 0,0051 \cdot M + 0,5789$
Кишечник	$m = 0,0427 \cdot M + 3,0527$
Сечовий міхур	$m = 0,0038 \cdot M + 0,3176$

* Залежності виконуються для маси тіла $M \geq 100$ г.

Для визначення середньоінтегральної маси органа слід використовувати вирази, відображені в табл. 2, підставляючи замість M середньоінтегральну масу тіла \bar{M} .

Отже, ми отримали всі необхідні складові для визначення доз внутрішнього опромінення за тривалого надходження радіонуклідів.

У результаті попередніх досліджень ми підготували теоретичне й експериментальне підґрунтя для розробки експрес-методики для визначення доз внутрішнього опромінення за тривалого надходження до організму $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$.

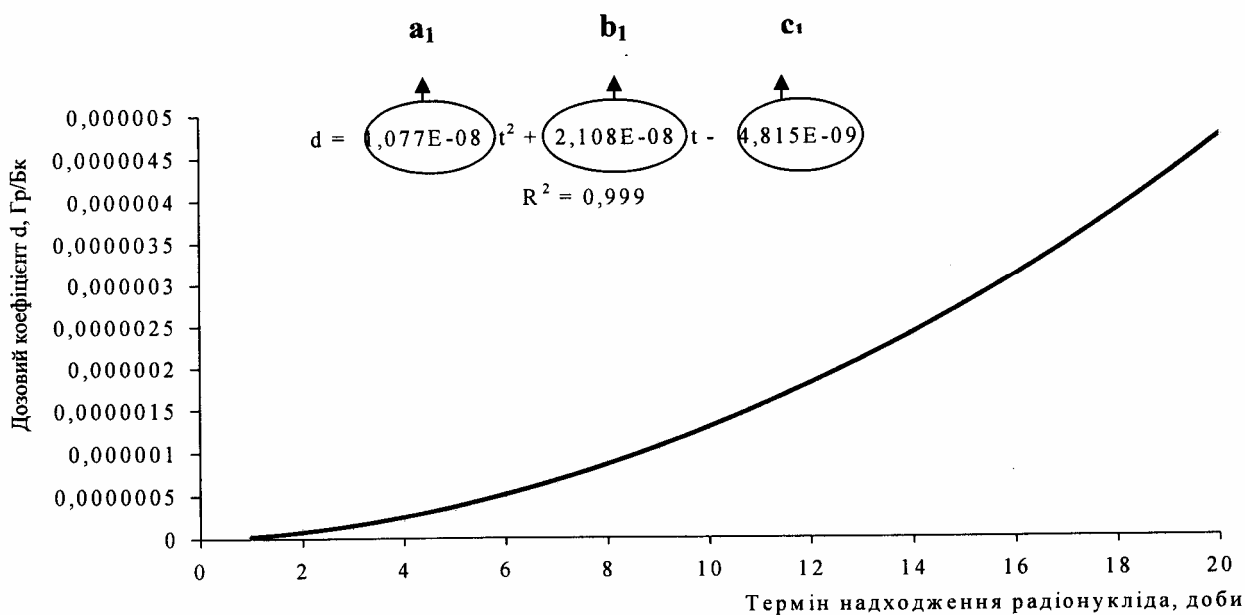
Суть методики полягає в наступному:

1. Використовуючи теорію камерних моделей і результати попередніх досліджень, ми розрахували дозові коефіцієнти за хронічного надходження 1 Бк $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ до організму лабораторних щурів залежно від їхньої маси та терміну надходження ізотопу. Дозовий коефіцієнт – це поглинута доза, яка формується за рахунок щоденного надходження 1 Бк ізотопу. Діапазон зміни середньоінтегральної маси тварин становив $100 \div 450$ г з кроком 10 г, а калькульований термін надходження ізотопу - 150 дб з кроком 1 доба. Як приклад, у табл. 3 представлено дані розрахунків для кісткової тканини тварин (термін надходження ізотопу обмежено 5 добами).

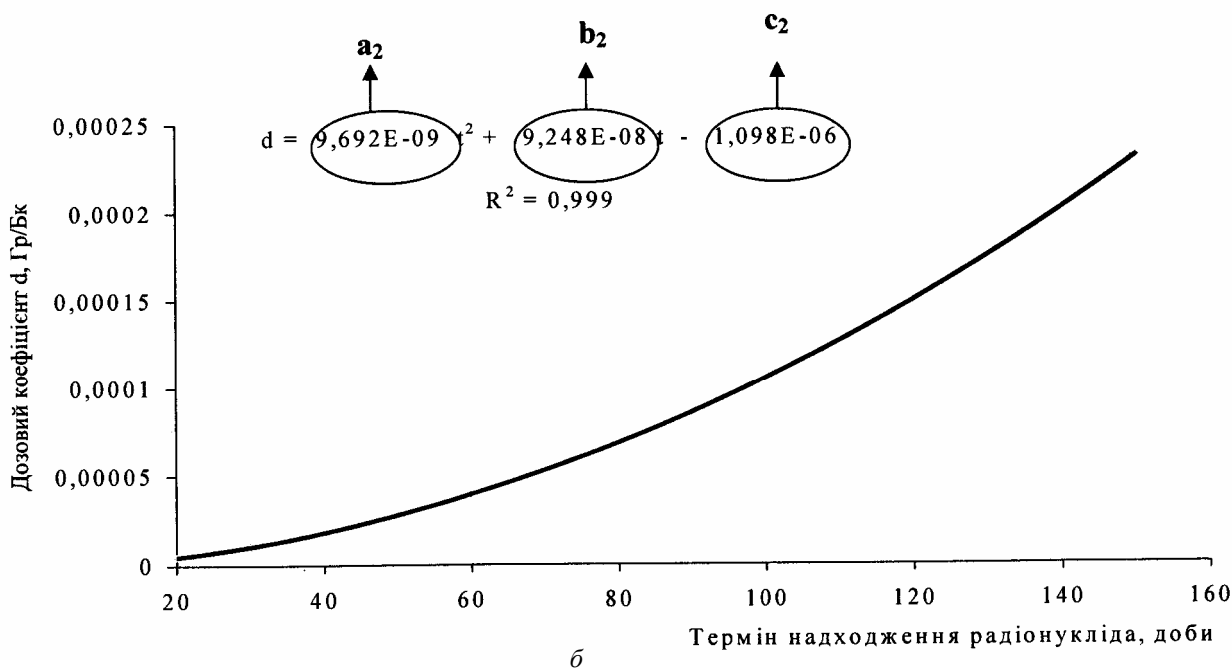
Таблиця 3. Значення дозових коефіцієнтів для кісткової тканини за щоденного перорального хронічного надходження 1 Бк $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Маса, г	Дозовий коефіцієнт d, Гр/Бк				
	Термін надходження ізотопу, доби				
	1	2	3	4	5
100	$4,323 \cdot 10^{-8}$	$1,222 \cdot 10^{-7}$	$2,342 \cdot 10^{-7}$	$3,791 \cdot 10^{-7}$	$5,568 \cdot 10^{-7}$
110	$4,211 \cdot 10^{-8}$	$1,190 \cdot 10^{-7}$	$2,281 \cdot 10^{-7}$	$3,693 \cdot 10^{-7}$	$5,424 \cdot 10^{-7}$
120	$4,104 \cdot 10^{-8}$	$1,160 \cdot 10^{-7}$	$2,223 \cdot 10^{-7}$	$3,599 \cdot 10^{-7}$	$5,286 \cdot 10^{-7}$
130	$3,997 \cdot 10^{-8}$	$1,130 \cdot 10^{-7}$	$2,165 \cdot 10^{-7}$	$3,505 \cdot 10^{-7}$	$5,148 \cdot 10^{-7}$
140	$3,890 \cdot 10^{-8}$	$1,100 \cdot 10^{-7}$	$2,107 \cdot 10^{-7}$	$3,411 \cdot 10^{-7}$	$5,010 \cdot 10^{-7}$
150	$3,784 \cdot 10^{-8}$	$1,070 \cdot 10^{-7}$	$2,050 \cdot 10^{-7}$	$3,319 \cdot 10^{-7}$	$4,875 \cdot 10^{-7}$
160	$3,683 \cdot 10^{-8}$	$1,041 \cdot 10^{-7}$	$1,995 \cdot 10^{-7}$	$3,229 \cdot 10^{-7}$	$4,744 \cdot 10^{-7}$
170	$3,582 \cdot 10^{-8}$	$1,012 \cdot 10^{-7}$	$1,940 \cdot 10^{-7}$	$3,141 \cdot 10^{-7}$	$4,613 \cdot 10^{-7}$
180	$3,483 \cdot 10^{-8}$	$9,850 \cdot 10^{-8}$	$1,887 \cdot 10^{-7}$	$3,054 \cdot 10^{-7}$	$4,487 \cdot 10^{-7}$
190	$3,387 \cdot 10^{-8}$	$9,577 \cdot 10^{-8}$	$1,835 \cdot 10^{-7}$	$2,970 \cdot 10^{-7}$	$4,362 \cdot 10^{-7}$
200	$3,294 \cdot 10^{-8}$	$9,314 \cdot 10^{-8}$	$1,784 \cdot 10^{-7}$	$2,888 \cdot 10^{-7}$	$4,242 \cdot 10^{-7}$
210	$3,202 \cdot 10^{-8}$	$9,055 \cdot 10^{-8}$	$1,734 \cdot 10^{-7}$	$2,808 \cdot 10^{-7}$	$4,124 \cdot 10^{-7}$
220	$3,113 \cdot 10^{-8}$	$8,804 \cdot 10^{-8}$	$1,687 \cdot 10^{-7}$	$2,730 \cdot 10^{-7}$	$4,010 \cdot 10^{-7}$
230	$3,027 \cdot 10^{-8}$	$8,561 \cdot 10^{-8}$	$1,640 \cdot 10^{-7}$	$2,655 \cdot 10^{-7}$	$3,899 \cdot 10^{-7}$
240	$2,945 \cdot 10^{-8}$	$8,329 \cdot 10^{-8}$	$1,595 \cdot 10^{-7}$	$2,582 \cdot 10^{-7}$	$3,793 \cdot 10^{-7}$
250	$2,865 \cdot 10^{-8}$	$8,102 \cdot 10^{-8}$	$1,552 \cdot 10^{-7}$	$2,512 \cdot 10^{-7}$	$3,690 \cdot 10^{-7}$

2. Використовуючи дані таблиць, будували залежність дозових коефіцієнтів від терміну надходження ізотопів. На рисунку наведено зміни дозових коефіцієнтів у динаміці хронічного надходження 1 Бк $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ до організму тварин масою 250 г.



a



б

Примітка. У представлених формулах: d - дозовий коефіцієнт, t - термін надходження радіонукліда; a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 – розрахункові параметри; R^2 - коефіцієнт детермінації.

Результат математичної інтерпретації часової динаміки накопичення дози в кістковій тканині лабораторних щурів за щоденного перорального надходження 1 Бк $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$:
 a – термін надходження до 20 діб; $б$ – 20 - 150 діб .

Математичну інтерпретацію даних проводили за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel 2003. Слід зазначити, що зміни дозових коефіцієнтів неможливо коректно описати однією функцією, тому нам довелося розбити криву на дві ділянки - до 20 і понад 20 діб,

у результаті чого ми отримали відповідні математичні вирази, з певними розрахунковими параметрами (a , b , c). Такі розрахункові параметри були отримані для кожного органу і для кожної фіксованої середньоінтегральної маси тварин.

Таким чином для кісткової тканини лабораторних щурів за тривалого перорального надходження стронцію значення дозових коефіцієнтів за тривалості надходження до 20 діб описуються залежністю $d = a_1 t^2 + b_1 t + c_1$ (див. рисунок, а), а понад 20 діб – $d = a_2 t^2 + b_2 t + c_2$, (див. рисунок, б), де t - термін надходження ізотопу, доби.

3. На основі отриманих даних для кожного органа тварини з певною масою побудовано базові таблиці, які надають можливість отримати значення дозового коефіцієнта для будь-якого терміну опромінення. Коефіцієнти для розрахунку дозового коефіцієнта для кісткової тканини (Гр/Бк) за внутрішнього надходження $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ представлено в табл. 4.

Таблиця 4. Розрахункові параметри для обчислення дозового коефіцієнта для кісткової тканини (Гр/Бк) за внутрішнього надходження $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Середньо-інтегральна маса тварини, г	Значення розрахункових параметрів					
	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
100	$1,625 \cdot 10^{-8}$	$3,181 \cdot 10^{-8}$	$-7,266 \cdot 10^{-9}$	$1,462 \cdot 10^{-8}$	$1,395 \cdot 10^{-7}$	$-1,657 \cdot 10^{-6}$
110	$1,583 \cdot 10^{-8}$	$3,099 \cdot 10^{-8}$	$-7,078 \cdot 10^{-9}$	$1,424 \cdot 10^{-8}$	$1,359 \cdot 10^{-7}$	$-1,614 \cdot 10^{-6}$
120	$1,543 \cdot 10^{-8}$	$3,020 \cdot 10^{-8}$	$-6,898 \cdot 10^{-9}$	$1,388 \cdot 10^{-8}$	$1,324 \cdot 10^{-7}$	$-1,573 \cdot 10^{-6}$
130	$1,503 \cdot 10^{-8}$	$2,941 \cdot 10^{-8}$	$-6,717 \cdot 10^{-9}$	$1,352 \cdot 10^{-8}$	$1,290 \cdot 10^{-7}$	$-1,532 \cdot 10^{-6}$
140	$1,462 \cdot 10^{-8}$	$2,863 \cdot 10^{-8}$	$-6,538 \cdot 10^{-9}$	$1,315 \cdot 10^{-8}$	$1,255 \cdot 10^{-7}$	$-1,491 \cdot 10^{-6}$
150	$1,423 \cdot 10^{-8}$	$2,785 \cdot 10^{-8}$	$-6,361 \cdot 10^{-9}$	$1,280 \cdot 10^{-8}$	$1,221 \cdot 10^{-7}$	$-1,451 \cdot 10^{-6}$
160	$1,385 \cdot 10^{-8}$	$2,710 \cdot 10^{-8}$	$-6,190 \cdot 10^{-9}$	$1,245 \cdot 10^{-8}$	$1,188 \cdot 10^{-7}$	$-1,412 \cdot 10^{-6}$
170	$1,346 \cdot 10^{-8}$	$2,636 \cdot 10^{-8}$	$-6,020 \cdot 10^{-9}$	$1,211 \cdot 10^{-8}$	$1,156 \cdot 10^{-7}$	$-1,373 \cdot 10^{-6}$
180	$1,310 \cdot 10^{-8}$	$2,563 \cdot 10^{-8}$	$-5,854 \cdot 10^{-9}$	$1,178 \cdot 10^{-8}$	$1,124 \cdot 10^{-7}$	$-1,335 \cdot 10^{-6}$
190	$1,273 \cdot 10^{-8}$	$2,492 \cdot 10^{-8}$	$-5,692 \cdot 10^{-9}$	$1,145 \cdot 10^{-8}$	$1,093 \cdot 10^{-7}$	$-1,298 \cdot 10^{-6}$
200	$1,238 \cdot 10^{-8}$	$2,424 \cdot 10^{-8}$	$-5,536 \cdot 10^{-9}$	$1,114 \cdot 10^{-8}$	$1,063 \cdot 10^{-7}$	$-1,262 \cdot 10^{-6}$
210	$1,204 \cdot 10^{-8}$	$2,356 \cdot 10^{-8}$	$-5,381 \cdot 10^{-9}$	$1,083 \cdot 10^{-8}$	$1,033 \cdot 10^{-7}$	$-1,227 \cdot 10^{-6}$
220	$1,170 \cdot 10^{-8}$	$2,291 \cdot 10^{-8}$	$-5,233 \cdot 10^{-9}$	$1,053 \cdot 10^{-8}$	$1,005 \cdot 10^{-7}$	$-1,193 \cdot 10^{-6}$
230	$1,138 \cdot 10^{-8}$	$2,228 \cdot 10^{-8}$	$-5,088 \cdot 10^{-9}$	$1,024 \cdot 10^{-8}$	$9,772 \cdot 10^{-8}$	$-1,160 \cdot 10^{-6}$
240	$1,107 \cdot 10^{-8}$	$2,167 \cdot 10^{-8}$	$-4,950 \cdot 10^{-9}$	$9,963 \cdot 10^{-9}$	$9,506 \cdot 10^{-8}$	$-1,129 \cdot 10^{-6}$
250	$1,077 \cdot 10^{-8}$	$2,108 \cdot 10^{-8}$	$-4,815 \cdot 10^{-9}$	$9,692 \cdot 10^{-9}$	$9,248 \cdot 10^{-8}$	$-1,098 \cdot 10^{-6}$
260	$1,048 \cdot 10^{-8}$	$2,052 \cdot 10^{-8}$	$-4,687 \cdot 10^{-9}$	$9,433 \cdot 10^{-9}$	$9,001 \cdot 10^{-8}$	$-1,069 \cdot 10^{-6}$
270	$1,021 \cdot 10^{-8}$	$1,998 \cdot 10^{-8}$	$-4,563 \cdot 10^{-9}$	$9,185 \cdot 10^{-9}$	$8,764 \cdot 10^{-8}$	$-1,041 \cdot 10^{-6}$
280	$9,942 \cdot 10^{-9}$	$1,945 \cdot 10^{-8}$	$-4,443 \cdot 10^{-9}$	$8,943 \cdot 10^{-9}$	$8,534 \cdot 10^{-8}$	$-1,013 \cdot 10^{-6}$
290	$9,692 \cdot 10^{-9}$	$1,896 \cdot 10^{-8}$	$-4,331 \cdot 10^{-9}$	$8,718 \cdot 10^{-9}$	$8,319 \cdot 10^{-8}$	$-9,882 \cdot 10^{-7}$
300	$9,450 \cdot 10^{-9}$	$1,849 \cdot 10^{-8}$	$-4,223 \cdot 10^{-9}$	$8,500 \cdot 10^{-9}$	$8,111 \cdot 10^{-8}$	$-9,635 \cdot 10^{-7}$
310	$9,219 \cdot 10^{-9}$	$1,804 \cdot 10^{-8}$	$-4,120 \cdot 10^{-9}$	$8,292 \cdot 10^{-9}$	$7,913 \cdot 10^{-8}$	$-9,399 \cdot 10^{-7}$
320	$9,004 \cdot 10^{-9}$	$1,762 \cdot 10^{-8}$	$-4,024 \cdot 10^{-9}$	$8,099 \cdot 10^{-9}$	$7,728 \cdot 10^{-8}$	$-9,180 \cdot 10^{-7}$
330	$8,798 \cdot 10^{-9}$	$1,721 \cdot 10^{-8}$	$-3,932 \cdot 10^{-9}$	$7,914 \cdot 10^{-9}$	$7,551 \cdot 10^{-8}$	$-8,970 \cdot 10^{-7}$
340	$8,604 \cdot 10^{-9}$	$1,684 \cdot 10^{-8}$	$-3,845 \cdot 10^{-9}$	$7,740 \cdot 10^{-9}$	$7,385 \cdot 10^{-8}$	$-8,773 \cdot 10^{-7}$
350	$8,423 \cdot 10^{-9}$	$1,648 \cdot 10^{-8}$	$-3,764 \cdot 10^{-9}$	$7,576 \cdot 10^{-9}$	$7,229 \cdot 10^{-8}$	$-8,588 \cdot 10^{-7}$
360	$8,254 \cdot 10^{-9}$	$1,615 \cdot 10^{-8}$	$-3,689 \cdot 10^{-9}$	$7,424 \cdot 10^{-9}$	$7,084 \cdot 10^{-8}$	$-8,415 \cdot 10^{-7}$
370	$8,095 \cdot 10^{-9}$	$1,584 \cdot 10^{-8}$	$-3,618 \cdot 10^{-9}$	$7,282 \cdot 10^{-9}$	$6,948 \cdot 10^{-8}$	$-8,254 \cdot 10^{-7}$
380	$7,947 \cdot 10^{-9}$	$1,555 \cdot 10^{-8}$	$-3,552 \cdot 10^{-9}$	$7,148 \cdot 10^{-9}$	$6,821 \cdot 10^{-8}$	$-8,103 \cdot 10^{-7}$
390	$7,811 \cdot 10^{-9}$	$1,528 \cdot 10^{-8}$	$-3,491 \cdot 10^{-9}$	$7,026 \cdot 10^{-9}$	$6,704 \cdot 10^{-8}$	$-7,964 \cdot 10^{-7}$
400	$7,686 \cdot 10^{-9}$	$1,504 \cdot 10^{-8}$	$-3,435 \cdot 10^{-9}$	$6,913 \cdot 10^{-9}$	$6,597 \cdot 10^{-8}$	$-7,836 \cdot 10^{-7}$
410	$7,571 \cdot 10^{-9}$	$1,481 \cdot 10^{-8}$	$-3,383 \cdot 10^{-9}$	$6,810 \cdot 10^{-9}$	$6,498 \cdot 10^{-8}$	$-7,719 \cdot 10^{-7}$
420	$7,466 \cdot 10^{-9}$	$1,461 \cdot 10^{-8}$	$-3,337 \cdot 10^{-9}$	$6,716 \cdot 10^{-9}$	$6,408 \cdot 10^{-8}$	$-7,613 \cdot 10^{-7}$
430	$7,372 \cdot 10^{-9}$	$1,442 \cdot 10^{-8}$	$-3,294 \cdot 10^{-9}$	$6,631 \cdot 10^{-9}$	$6,327 \cdot 10^{-8}$	$-7,516 \cdot 10^{-7}$
440	$7,286 \cdot 10^{-9}$	$1,426 \cdot 10^{-8}$	$-3,256 \cdot 10^{-9}$	$6,554 \cdot 10^{-9}$	$6,254 \cdot 10^{-8}$	$-7,429 \cdot 10^{-7}$
450	$7,209 \cdot 10^{-9}$	$1,411 \cdot 10^{-8}$	$-3,222 \cdot 10^{-9}$	$6,485 \cdot 10^{-9}$	$6,188 \cdot 10^{-8}$	$-7,351 \cdot 10^{-7}$

Доза на орган чи тканину визначається як

$$D = d \cdot q,$$

де q – активність, яка щоденно надходить до організму, Бк.

Дози за запропонованою методикою визначаються у такій послідовності:

тварину зважують на початку надходження ізотопу до організму та у термін, на який визначають дозу;

за допомогою спеціально побудованої табл. 1, за значеннями початкової та прикінцевої маси, визначають середньоінтегральну масу тварини;

за значеннями середньоінтегральної маси та терміну опромінення, використовуючи відповідну базову таблицю, розраховують дозові коефіцієнти;

перемножуючи значення активності, яка щоденно надходить до організму тварини, на відповідні дозові коефіцієнти, отримують значення поглинутої дози, якщо розглядають опромінення окремого органа чи тканини, та ефективної дози, якщо розглядають опромінення усього тіла.

Таким чином, у результаті проведених досліджень запропоновано методику для визначення доз внутрішнього опромінення за тривалого надходження ізотопів до організму. На прикладі надходження стронцію продемонстровано послідовність реалізації цієї методики, отримано дозові коефіцієнти та розрахункові параметри для обчислення поглинутих доз, складено базові таблиці, які дають змогу досить легко, використовуючи лише калькулятор, розрахувати поглинуті, а також ефективні дози в основних органах і тканинах. Ця методика є універсальною і її можна застосувати при пероральному надходженні до організму будь-якого радіонукліда.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Чорнобильська катастрофа* / Під ред. В. Г. Бар'ятара. - К.: Наук. думка, 1996. - 575 с.
2. *20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє: Національна доповідь України*. - К.: Атіка, 2006. - 224 с.
3. *Борисова В.В., Воеводина Т.М., Федорова А.В., Яковлева Н.Г.* Биологические эффекты при длительном поступлении радионуклидов. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 167 с.
4. *Ильин Б.Н., Борисова В.В., Ветух В.А.* Отдаленные биологические эффекты комбинированного действия радионуклидов различной тропности. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 160 с.
5. *ICRP Publication 69: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients // Annals of the ICRP.* - 1995. - Vol. 25/1.
6. *ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients // Annals of the ICRP.* - 1996. - Vol. 26/1.
7. *Лихтарев И.А.* Кинетика транспорта радиоизотопов в организме человека и экспериментальных животных: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук / ЛИРГ. - Л., 1974. - 32 с.
8. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 192 с.
9. *Дрозд І.П., Липська А.І., Гриневич Ю.П., Мінчук І.Я.* Дослідження кінетики обміну $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ та формування поглинутих доз при його одноразовому надходженні до організму щурів у модельному експерименті // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослід. - 2003. - № 1. - С. 97 - 105.
10. *Дрозд І.П., Липська А.І., Алесіна М.Ю., Кучма М.Д.* Еспериментальне моделювання хронічного комбінованого (внутрішнього та зовнішнього) опромінення тварин // Вплив радіаційного фактора Чорнобильської зони відчуження на організм тварин / За ред. М. Ю. Алесіної і Я. І. Серкіза. - К.: Атіка. - 2006. - С. 8 - 26.
11. *Липська А.І., Дрозд І.П.* Формування доз опромінення за перорального надходження стронцію до організму щурів // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. - 2006. - № 8. - С. 169 - 178.

РАЗРАБОТКА ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

А. И. Липская, И. П. Дрозд

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложено методику расчета доз внутреннего облучения лабораторных крыс с использованием многокамерной дозиметрической модели кинетики стронция. Разработанная экспресс-методика позволяет существенно упростить трудоемкий процесс расчета поглощенных доз внутреннего облучения при длительном пероральном поступлении $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ в организм животных.

DEVELOPMENT OF EXPRESS METHOD FOR CALCULATION OF INTERNAL IRRADIATION DOSES OF LABORATORY RATS USING THE CHAMBER MODELS

A. I. Lypska, I. P. Drozd

On the basis of theoretical and experimental material, the calculation method of doses of internal irradiation of laboratory rats using the multichamber dosimetry model of metabolism of strontium. The developed express method allows to simplify substantially the process of calculation of absorbed doses of internal irradiation after the chronic intake of $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ in the organism of laboratory rats.

Надійшла до редакції 20.02.07,
після доопрацювання – 25.04.07.