

ОСОБЛИВОСТІ ДОЗООТВОРЕННЯ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ДОЗ ПРИ ВНУТРІШНЬОМУ НАДХОДЖЕННІ ^{137}Cs ДО ОРГАНІЗМУ ЛАБОРАТОРНИХ ЩУРІВА. І. Липська¹, І. П. Дрозд²¹Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Київ²Інститут проблем національної безпеки при РНБО України, Київ

Розглянуто проблему дозозотворення при пероральному надходженні ^{137}Cs до організму лабораторних щурів. Уперше експериментально визначено функції утримання ізотопу в різних органах та тканинах, значення біокінетичних констант для кожного органа при одноразовому та хронічному надходженні до організму, а також виявлено деякі характерні особливості біокінетики цезію. Для описування кінетики радіонукліда в організмі запропоновано багатокамерну модель. Обговорюються переваги застосування запропонованої багатокамерної моделі для дозиметрії внутрішнього опромінення порівняно з існуючими.

Постановка проблеми. Питання дозозотворення у біологічних об'єктах є однією з актуальних проблем радіоекології та радіобіології. Для з'ясування та коректного трактування біологічних ефектів, що виникають унаслідок дії іонізуючої радіації на живі організми, необхідно чітко уявляти, які процеси протікають при взаємодії іонізуючих випромінювань різного походження з біологічною речовиною. Відомо, що кожен орган і тканина має свою радіочутливість, що визначається їх функціональними та іншими специфічними особливостями. Звідси випливає, що одна й та ж енергія іонізуючих випромінювань, поглинена в різних органах та нормована на одиницю маси (тобто поглинена доза), призведе до різних за величиною біологічних ефектів. Цей незаперечний факт ураховують при нормуванні дії іонізуючих випромінювань, уводячи поняття *ефективної дози*, яка визначається як сума добутоків поглинених доз у кожному з основних органів на так звані тканинні зважуючі фактори, що враховують відносну небезпеку їх опромінення (за сумарною шкодою, що визначається структурними та функціональними порушеннями життєдіяльності) порівняно з опроміненням усього організму.

При звичайних умовах доза фонового опромінення визначається зовнішнім компонентом, обумовленим природним радіаційним фоном, який для різних регіонів України становить 0,5 - 2,0 мЗв/рік, та внутрішнім, спричиненим природною радіоактивністю продуктів харчування (в основному завдяки вмісту ізотопу ^{40}K). Річна доза внутрішнього опромінення 0,1 - 0,5 мЗв. Після аварії на Чорнобильській АЕС ситуація суттєво змінилася. Унаслідок викиду в навколишнє середовище величезної кількості радіоактивних продуктів поділу урану (у тому числі довгоживучих) внутрішнє опромінення, починаючи з 1987 р., стало домінуючим. Тому при вивченні радіоекологічних задач та радіобіологічних ефектів у ссавців після Чорнобильської аварії, ураховуючи, що ^{137}Cs є одним з основних дозозотворюючих компонентів, питання коректного визначення доз опромінення кожного конкретного органа при внутрішньому надходженні цього ізотопу до організму є дуже актуальним.

Ядерно-фізичні та метаболічні властивості цезію

Цезій – це лужний метал І групи періодичної системи Менделєєва з атомним номером 55 та середнім масовим числом 132,9. На даний час відомо 23 радіоактивних ізотопи цезію з масовими числами від 123 до 144. Найбільше дозозотворююче значення мають ізотопи ^{134}Cs та ^{137}Cs . ^{137}Cs є одним із довгоживучих продуктів поділу урану. У продуктах поділу міститься до 6 % ізотопів цезію. ^{137}Cs – β -випромінювач із періодом напіврозпаду 30 років. Гранична енергія β -спектра $E_{\beta i} = 0,51 \text{ MeV}$ (95 %) та 1,17 MeV (5 %). Продукт розпаду ^{137}Cs , збуджений ^{137m}Ba з періодом напіврозпаду 2,57 хв, випромінює γ -кванти з енергією 0,662 MeV. ^{134}Cs – змішаний β -, γ -випромінювач із періодом напіврозпаду 2,062 років. $E_{\beta i} = (0,09 - 1,45) \text{ MeV}$, $E_{\gamma i} = (0,03 - 1,8) \text{ MeV}$. Цезій за своїми хімічними властивостями близький до рубідію та калію – елементів І групи [1, 2].

Ізотопи цезію добре всмоктуються при будь-якому шляху надходження до організму. Вважають, що всмоктування цезію в шлунково-кишковому тракті (ШКТ) тварин та людини становить 100 % [3]. Потрапивши в кров, радіонуклід швидко покидає кров'яне русло і досить рівномірно розподіляється по органах та тканинах. Понад 50 % цезію накопичується в м'язах. Шлях надходження та вид тварин не впливають на особливості розподілу цезію в їх органах та тканинах. Кратність накопичення при хронічному надходженні ізотопу різна для різних тварин та лю-

дини і становить для мишей 3 [1], для щурів 10 [4], для людини 150 [1]. Ці дані дають змогу розрахувати ефективний період напіввиведення цезію з організму, який відповідно становитиме для мишей 2 доби, для щурів 8 діб, для людини 105 діб. При хронічному надходженні цезію його вміст, нормований на одиницю маси органа, у нирках та печінці значно більший, ніж у м'язовій тканині [4]. При одноразовому надходженні виведення цезію з організму здійснюється переважно через нирки. Упродовж першого місяця після введення з сечею виводиться у 6 - 9 разів більше ізотопу, ніж з калом. При хронічному надходженні радіонуклід виводиться з організму із сечею та калом приблизно в однаковій пропорції при невеликому переважанні того чи іншого шляху виведення залежно від виду тварин та особливостей їх раціону [1].

Матеріали та методи дослідження

Для вивчення кінетики цезію при його одноразовому надходженні до організму 45 статево-зрілим білим безпородним щурам-самцям з початковою масою тіла 220 ± 20 г було введено перорально через зонд по 24,5 кБк водного розчину хлористого ^{137}Cs . Тварин забивали методом швидкої декапітації по 5 шт. з періодичністю 0,5 год, 3 год, 1, 2, 3, 4, 7, 14, 41 та 67 діб, виокремлювали органи та тканини, зважували їх на електронних вагах і вимірювали вміст у них ізотопу спектрометричним методом, описаним нижче.

З метою вивчення кінетики цезію при його хронічному надходженні до організму 35 статево-зрілим білим безпородним щурам-самцям з початковою масою тіла 220 ± 20 г щоденно перорально через зонд упродовж 45 діб вводили по 15 кБк водного розчину хлористого ^{137}Cs . Тварин забивали по 5 шт. з періодичністю 1, 8, 22 та 45 діб. П'ятнадцять тварин, що залишилися, забивали через 26, 46 та 62 доби після закінчення введення ізотопу для вивчення кінетики його виведення після тривалого надходження до організму. Процедура вимірювання вмісту ізотопу в органах і тканинах здійснювали, як в експерименті з одноразовим уведенням.

Для вимірювання вмісту цезію в органах і тканинах спектрометричним методом використовували напівпровідниковий детектор фірми ORTEC типу GEM-30185 з відносною ефективністю реєстрації 30 % та роздільною здатністю 1,85 кеВ на лінії 1,33 МеВ. Обрахунки спектрів, ідентифікацію радіонуклідів та розрахунки їх активностей здійснювали на аналізаторі AFORA за допомогою програми GAMMA. Активності розраховували за формулою

$$A = 3,7 \cdot 10^{10} (N - f) \cdot 1000 / (\varepsilon \cdot Y \cdot m), \quad (1)$$

де A – активність проби, Бк/кг; N – швидкість рахунку, с^{-1} ; f – фон спектрометра, с^{-1} ; ε – ефективність реєстрації для відповідної геометрії, $\text{с}^{-1}/\text{Бк}$; Y – квантовий вихід для ^{137}Cs ; m – маса зразка, г.

Методи розрахунку доз

Розрахунки доз внутрішнього опромінення виконували за камерними моделями, де камерами вважали певні органи чи тканини організму з характерними лише для них особливостями кінетики радіонукліда (багатокамерна модель) або організм у цілому (одногокамерна модель) [5]. При цьому кінетика радіонукліда описується системою диференціальних рівнянь першого порядку, складених на основі балансу активностей у камерах:

$$\frac{d\vec{q}}{dt} = A\vec{q}(t), \quad (2)$$

де A – матриця системи, недиагональними елементами якої є константи переходу радіонукліда між камерами (λ_{ij}); $\vec{q}(t)$ – вектор, компоненти якого дорівнюють вмісту радіонукліда в органах.

У загальному випадку сукупність поглинених доз в органах для n -камерної моделі можна представити як n -вимірний вектор

$$\vec{D} = kN\varepsilon F \int_{t_0}^t \vec{q}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

де $(\vec{D})_i \equiv D_i$ – поглинена доза в i -му органі за час $t \div t_0$ від початку спостереження t_0 при накопиченні дози, Гр; $(\vec{q}(\tau))_i \equiv q_i(\tau)/m_i$ – активність радіонукліда в i -му органі в момент часу τ ($\tau \in [t_0, \dots, t]$), віднесена до маси i -го органа, Бк/кг; F – матриця розміром $n \times n$ з елементами $F_{ij} = F(j \rightarrow i)$, ($i, j = 1, \dots, n$), де $F(j \rightarrow i)$ – середня фракція поглиненої енергії в камері-мішені i від випромінювання, що створюється в камері-джерелі j ; ε – середня енергія випромінювання даного виду, МеВ/розпад; N – вихід даного виду випромінювання на 1 розпад; $k = 1,6 \times 10^{-13}$ Дж/МеВ.

Дози від цезію можна також оцінити, застосувавши одногокамерну модель [2]. При цьому доза за час t (доби) при одноразовому надходженні ізотопу визначається як

$$D^{(1)} = 2 \cdot 10^{-8} C_0 \cdot E_{\text{ef}} \cdot T_{\text{ef}} / m \cdot [1 - \exp(-0.693 \cdot t / T_{\text{ef}})], \quad (4)$$

а при тривалому надходженні

$$D^{(2)} = 2 \cdot 10^{-8} q_0 \cdot E_{\text{еф}} \cdot T_{\text{еф}} / m \times$$

$$\times \{t - [1 - \exp(-0,693 \cdot t/T_{\text{еф}})] / (0,693/T_{\text{еф}})\}, \quad (4')$$

де C_0 - активність, що одноразово надійшла до органа, Бк; q_0 - активність, яка щоденно надходить до органа, Бк; $E_{\text{еф}}$ - ефективна енергія радіонукліда, МеВ/розпад; $T_{\text{еф}}$ - ефективний період напіврозпаду радіонукліда, доби; m - маса органа, кг; t - поточний час, доби.

$$E_{\text{еф}} = E_{\beta} + E_{\gamma}, \quad (5)$$

де E_{β} та E_{γ} - складові ефективної енергії відповідно від β - та γ -випромінювань.

$$E_{\beta} = 0,33 E_{\beta i} \cdot f (1 - Z^{1/2} / 50) (1 + E_{\beta i}^{1/2} / 4), \quad (6)$$

де $E_{\beta i}$ - гранична енергія β -спектра, МеВ; f - частка розпадів даного типу; Z - атомний номер нукліда.

$$E_{\gamma} = E_{\gamma i} \cdot f [1 - \exp(-\mu X)], \quad (7)$$

де $E_{\gamma i}$ - енергія γ -квантів, МеВ; μ - лінійний коефіцієнт передачі енергії, см^{-1} ; X - ефективний радіус органа, що містить радіонуклід, см.

Ефективні радіус кожного органа для щурів та відповідні ефективні енергії стосовно до опромінення ізотопом ^{137}Cs визначено авторами за власною методикою та опубліковано в роботі [6].

За умов тривалого експерименту ми маємо справу з нестаціонарними умовами опромінення, тому формули (4) і (4') у даному вигляді застосувати неможливо. Так, для наших умов $q_0 = q_0(t)$; $T_{\text{еф}} = T_{\text{еф}}(t)$; $m = m(t)$; $E_{\text{еф}} = E_{\text{еф}}(t)$ (оскільки в $E_{\text{еф}}$ складовою входить ефективний радіус органа, значення якого залежить від віку тварини).

Для нестаціонарних умов формули (4) і (4') відповідно матимуть вигляд

$$D^1(t) = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot C_0 \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} E_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{0,693 \cdot (t_2 - t_1)}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1}} \right) \right]}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} m(t) dt}{t_2 - t_1}} \quad (8)$$

$$D^2(t) = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_0(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} E_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \left\{ (t_2 - t_1) - 1,443 \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{0,693 \cdot (t_2 - t_1)}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{\text{еф}}(t) dt}{t_2 - t_1}} \right) \right] \right\}}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} m(t) dt}{t_2 - t_1}} \quad (8')$$

Функції $q_0(t)$, $m(t)$, $E_{\text{еф}}(t)$, $T_{\text{еф}}(t)$ ми визначали емпіричним шляхом, аналізуючи наявні літературні дані стосовно кінетики цезію [1, 3, 6 - 8].

Формули (8) і (8') досить складні в користуванні, тому нами встановлено математичні вирази для обчислення середньоінтегральних значень усіх змінних величин, які можна підставляти у формули (4) і (4') й виконувати необхідні розрахунки. У цьому випадку замість t слід підставити $(t_2 - t_1)$. Вирази для обчислення змінних величин мають такий вигляд:

середньоінтегральна маса тіла, г:
для тварин, віком до 50 діб

$$\bar{M} = [0,0063(t_2^3 - t_1^3) + 0,2973(t_2^2 - t_1^2) + 5,833(t_2 - t_1)] / (t_2 - t_1), \quad (9)$$

після 50 діб

$$\bar{M} = \{160,66 [t_2 (\ln t_2 - 1) - t_1 (\ln t_1 - 1)] - 548,2 (t_2 - t_1)\} / (t_2 - t_1); \quad (10)$$

ефективний період напіввиведення цезію з організму, доби

$$T_{\text{ef}} = 4 + 0,0196 (m_b - 5,6), \quad (11)$$

ефективна енергія ^{137}Cs , MeB/розпад

$$E_{\text{ef}} = 0,19 + 0,00035 (m_b - 5,6). \quad (12)$$

Щоденне надходження активності до організму пов'язане з масою денного раціону співвідношенням $q_0 = M_m \cdot Q$, де Q - питома активність корму, Бк/г; M_m - маса їжі, що щоденно вживається твариною, г. У формулі (9) значення t виражено у місяцях, а у формулі (10) - у добах.

Ефективну дозу визначали як суму добутоків доз, поглинених в органах і тканинах, на відповідні тканинні зважуючі фактори.

Для розв'язку систем диференціальних рівнянь використовували пакет прикладних програм Maple 6, а для статистичної обробки результатів – Excel 2000.

Результати та обговорення

У табл.1 і 2 відображено динаміку накопичення та утримання цезію в органах і тканинах тварин, задіяних в експерименті.

Таблиця 1. Вміст ^{137}Cs в органах і тканинах білих безпородних щурів при одноразовому пероральному надходженні до організму 24,5 кБк ізотопу, Бк*

Орган чи тканина	Термін після введення, доби									
	0,021	0,125	1	2	3	4	7	14	41	67
Кров	121 ± 23	189 ± 31	267 ± 39	228 ± 37	200 ± 33	178 ± 29	137 ± 23	86 ± 15	21 ± 4	7 ± 2
М'язи	895 ± 91	2734 ± 260	9290 ± 545	10099 ± 520	9774 ± 530	9450 ± 590	8600 ± 510	7000 ± 420	2872 ± 230	982 ± 95
Печінка	1184 ± 110	2102 ± 165	1700 ± 150	1300 ± 127	1110 ± 115	950 ± 105	648 ± 78	278 ± 42	128 ± 20	87 ± 15
Нирки	950 ± 98	1118 ± 130	550 ± 69	300 ± 42	232 ± 34	200 ± 32	150 ± 23	87 ± 16	36 ± 7	18 ± 4
Легені	86 ± 20	127 ± 25	185 ± 32	148 ± 21	130 ± 19	115 ± 19	92 ± 14	62 ± 10	16 ± 3	5 ± 2
Селезінка	39 ± 8	57 ± 11	130 ± 19	100 ± 18	80 ± 15	70 ± 16	50 ± 10	30 ± 7	10 ± 3	4 ± 2
Сім'яники	93 ± 16	114 ± 16	204 ± 32	250 ± 40	259 ± 45	240 ± 37	200 ± 34	159 ± 26	53 ± 10	12 ± 3
Кишковик	5123 ± 340	4900 ± 320	3700 ± 260	2750 ± 200	2050 ± 170	1628 ± 180	1018 ± 105	703 ± 79	253 ± 40	88 ± 16
Шлунок	14979 ± 740	9530 ± 480	500 ± 60	241 ± 38	176 ± 26	135 ± 19	62 ± 12	28 ± 8	17 ± 6	11 ± 3
Шкіра	1030 ± 100	1465 ± 135	2764 ± 220	2570 ± 200	2396 ± 195	2238 ± 155	1878 ± 135	1390 ± 120	509 ± 60	153 ± 22
Все тіло	24500 ± 1220	22336 ± 1100	19290 ± 1000	17986 ± 900	16407 ± 830	15204 ± 780	12835 ± 650	9825 ± 550	3915 ± 270	1367 ± 130

Таблиця 2. Вміст ^{137}Cs в органах та тканинах білих безпородних щурів при хронічному пероральному надходженні до організму 15 кБк/добу ізотопу

Орган чи тканина	Термін надходження ізотопу, доби					
	0,021	0,125	1	8	22	45
Кров	75 ± 15	115 ± 18	90 ± 16	375 ± 50	645 ± 80	1350 ± 125
М'язи	540 ± 65	1680 ± 185	4800 ± 310	48600 ± 1950	82650 ± 3200	94500 ± 2850
Печінка	720 ± 75	1290 ± 120	1395 ± 125	5550 ± 510	5805 ± 540	6000 ± 485
Нирки	585 ± 70	675 ± 75	240 ± 38	975 ± 98	1575 ± 140	3705 ± 260
Легені	52 ± 10	78 ± 16	150 ± 25	615 ± 77	960 ± 105	2100 ± 170
Селезінка	24 ± 5	34 ± 6	105 ± 17	330 ± 40	690 ± 77	1260 ± 120
Сім'яники	60 ± 11	75 ± 13	120 ± 21	1380 ± 125	2400 ± 190	6450 ± 410
Кишковик	3135 ± 260	3000 ± 230	2445 ± 210	9390 ± 550	12000 ± 610	12000 ± 600
Шлунок	9165 ± 540	5835 ± 360	300 ± 45	795 ± 95	1230 ± 110	3615 ± 260
Шкіра	225 ± 35	360 ± 50	1500 ± 143	7650 ± 425	14010 ± 750	15000 ± 770
Все тіло	14581 ± 730	13142 ± 660	11145 ± 600	75660 ± 3000	121965 ± 3600	145980 ± 4350

Багатокамерна модель, що пропонується нами для описання кінетики цезію в організмі лабораторних щурів, зображена на рисунку.

Система диференціальних рівнянь (2) для запропонованої моделі має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dq_1}{dt} = & q_2 \lambda_{2-1} + q_3 \lambda_{3-1} + q_4 \lambda_{4-1} + q_5 \lambda_{5-1} + \\ & + q_6 \lambda_{6-1} + q_7 \lambda_{7-1} + q_8 \lambda_{8-1} + q_9 \lambda_{9-1} + q_{11} \lambda_{11-1} - \\ & - q_1 (\lambda_{1-2} + \lambda_{1-3} + \lambda_{1-4} + \lambda_{1-5} + \lambda_{1-6} + \lambda_{1-7} + \end{aligned}$$

$$+ \lambda_{1-8} + \lambda_{1-9} + \lambda_{1-11});$$

$$\frac{dq_2}{dt} = q_1 \lambda_{1-2} - q_2 \lambda_{2-1};$$

$$\frac{dq_3}{dt} = q_1 \lambda_{1-3} - q_3 \lambda_{3-1};$$

$$\frac{dq_4}{dt} = q_1 \lambda_{1-4} - q_4 \lambda_{4-1} - q_4 \lambda_{4-9};$$

$$\frac{dq_5}{dt} = q_1 \lambda_{1-5} - q_5 \lambda_{5-1} - q_5 \lambda_{5-10};$$

$$\frac{dq_6}{dt} = q_1 \lambda_{1-6} - q_6 \lambda_{6-1} - q_6 \lambda_{6-11};$$

$$\frac{dq_7}{dt} = q_1 \lambda_{1-7} - q_7 \lambda_{7-1};$$

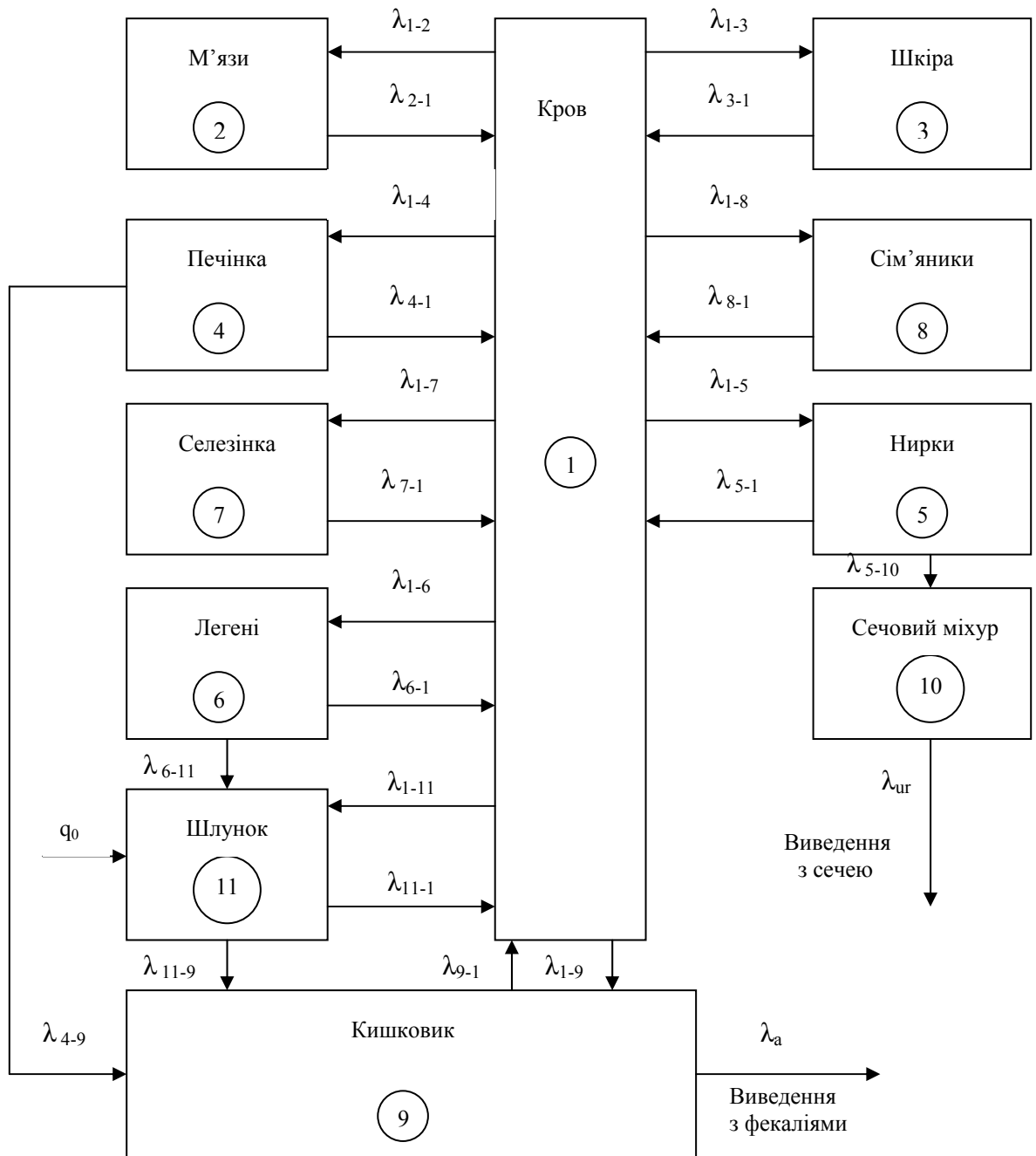
$$\frac{dq_8}{dt} = q_1 \lambda_{1-8} - q_8 \lambda_{8-1};$$

$$\frac{dq_9}{dt} = q_1 \lambda_{1-9} + q_4 \lambda_{4-9} + q_{11} \lambda_{11-9} - q_9 \lambda_{9-1} - q_9 \lambda_9;$$

$$\frac{dq_{10}}{dt} = q_5 \lambda_{5-10} - q_{10} \lambda_{10-1};$$

$$\frac{dq_{11}}{dt} = q_0 + q_1 \lambda_{1-11} + q_6 \lambda_{6-11} - q_{11} \lambda_{11-1} - q_{11} \lambda_{11-9}.$$

(13)



Блок-схема моделі кінетики цезію в організмі лабораторних щурів.

Розв'язавши систему рівнянь (13), ми отримали значення констант переходу радіонукліда між камерами, які для різних варіантів надходження до організму відображено у табл. 3.

Аналізуючи дані, наведені у табл. 3, ми дійшли висновку, що обмін цезію при його тривалому надходженні до організму суттєво прискорюється, повертаючись до висхідних показників після закінчення надходження ізотопу. При цьому значно прискорюється виведення радіонукліда з

сім'яників, несуттєво з м'язової тканини й вірогідно уповільнюється всмоктування в шлунку, імовірно за рахунок радіаційного ураження слизової оболонки цього органа. Найсуттєвішою різницею є радикальна зміна механізму всмоктування цезію. При одноразовому надходженні ізотоп переважно всмоктується у шлунку, а при хронічному – у кишковоки. Аналогічно змінюється й канал виведення радіонукліда.

Таблиця 3. Значення біокінетичних констант при тривалому надходженні ^{137}Cs до організму щурів

Біокінетична константа	Орган, тканина чи біологічна субстанція, між якими відбувається обмін	Значення λ_{m-p}		
		Одноразове надходження	Тривале надходження	Виведення після тривалого надходження
λ_{1-2}	кров – м'язи	8,662	11,177	8,662
λ_{1-3}	кров – шкіра	1,386	2,310	1,386
λ_{1-4}	кров – печінка	1,732	3,465	1,732
λ_{1-5}	кров – нирки	7,295	8,153	7,295
λ_{1-6}	кров – легені	0,178	0,266	0,178
λ_{1-7}	кров – селезінка	0,131	0,231	0,131
λ_{1-8}	кров – сім'яники	0,223	0,630	0,223
λ_{1-9}	кров – кишковик	0,173	6,930	0,173
λ_{1-11}	кров – шлунок	3,465	0,990	3,465
λ_{2-1}	м'язи – кров	0,092	0,217	0,098
λ_{3-1}	шкіра – кров	0,069	0,139	0,069
λ_{4-1}	печінка – кров	0,139	0,877	0,139
λ_{5-1}	нирки – кров	0,204	0,990	0,204
λ_{6-1}	легені – кров	0,115	0,277	0,115
λ_{7-1}	селезінка – кров	0,270	0,630	0,270
λ_{8-1}	сім'яники – кров	0,107	0,462	0,154
λ_{9-1}	кишковик – кров	0,173	2,475	0,173
λ_{11-1}	шлунок – кров	3,150	0,990	2,772
λ_{4-9}	печінка – кишковик	0,198	0,266	0,198
λ_{6-11}	легені – шлунок	0,087	0,198	0,087
λ_{5-10}	нирки – сечовий міхур	6,930	8,153	6,930
λ_{11-9}	шлунок – кишковик	0,420	11,550	0,420
λ_f	виведення з фекаліями	0,058	0,115	0,058
λ_{ur}	виведення з сечею	6,930	6,930	6,930

У результаті експерименту при одноразовому надходженні цезію до організму нами визначено функції утримання ізотопу в різних органах і тканинах (табл. 4).

Нами виявлено, що цезій не повністю всмоктується у ШКТ у білих безпородних щурів, віком 8 - 11 міс. При одноразовому надходженні коефіцієнт усмоктування 70 %, а при тривалому – 55,3 %, що суттєво впливає на процес формування доз внутрішнього опромінення.

Порівняльний розрахунок доз при одноразовому надходженні цезію до організму виконували для трьох варіантів, а при тривалому – для двох:

а) одноразове надходження:

за експериментально визначеними значеннями біокінетичних констант із застосуванням ба-

гатокамерної моделі;

за експериментально визначеними значеннями біокінетичних констант із застосуванням однокамерної моделі;

за однокамерною моделлю з використанням середніх значень біокінетичних констант, що опубліковані в спеціальній науковій літературі (лише для оцінки дози на все тіло);

б) тривале надходження:

за експериментально визначеними значеннями біокінетичних констант із застосуванням багатокамерної моделі;

за однокамерною моделлю з використанням середніх значень біокінетичних констант, що опубліковані в спеціальній науковій літературі (лише для оцінки дози на все тіло).

Таблиця 4. Біокінетичні константи ізотопів цезію для різних органів та тканин білих безпородних щурів

Орган чи тканина	Функція утримання	Константа виведення	Ефективний період напіввиведення, доби
Кров	$q = C_0 \cdot 0,012(0,44\exp(-\lambda_1 t) + 0,56\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 1$	$\lambda_1 = 0,0443;$ $\lambda_2 = 0,2016$	$T_{\text{еф}1} = 15,6;$ $T_{\text{еф}2} = 3,45$
М'язи	$q = C_0 \cdot 0,45\exp(-\lambda t); t \geq 2$	$\lambda = 0,0352$	$T_{\text{еф}} = 16,69$
Шкіра	$q = C_0 \cdot 0,09\exp(-\lambda t); t \geq 1$	$\lambda = 0,0436$	$T_{\text{еф}} = 15,85$
Печінка	$q = C_0 \cdot 0,0855(0,886\exp(-\lambda_1 t) + 0,114\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 0$	$\lambda_1 = 0,231;$ $\lambda_2 = 0,015$	$T_{\text{еф}1} = 3;$ $T_{\text{еф}2} = 46$
Нирки	$q = C_0 \cdot 0,0455(0,6\exp(-\lambda_1 t) + 0,3\exp(-\lambda_2 t) + 0,1\exp(-\lambda_3 t)); t \geq 0$	$\lambda_1 = 1,155; \lambda_2 = 0,346;$ $\lambda_3 = 0,0278$	$T_{\text{еф}1} = 0,6; T_{\text{еф}2} = 2;$ $T_{\text{еф}3} = 25$
Легені	$q = C_0 \cdot 0,0081(0,25\exp(-\lambda_1 t) + 0,75\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 1$	$\lambda_1 = 0,68209;$ $\lambda_2 = 0,05684$	$T_{\text{еф}1} = 1;$ $T_{\text{еф}2} = 12,19$
Селезінка	$q = C_0 \cdot 0,0069(0,75\exp(-\lambda_1 t) + 0,25\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 1$	$\lambda_1 = 0,3465;$ $\lambda_2 = 0,036474$	$T_{\text{еф}1} = 2;$ $T_{\text{еф}2} = 19$
Сім'яники	$q = C_0 \cdot 0,0122\exp(-\lambda t); t \geq 3$	$\lambda = 0,047793$	$T_{\text{еф}1} = 14,5$
Кишковик	$q = C_0 \cdot 0,21(0,76\exp(-\lambda_1 t) + 0,24\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 1$	$\lambda_1 = 0,5456;$ $\lambda_2 = 0,0393$	$T_{\text{еф}1} = 1,27;$ $T_{\text{еф}2} = 17,6$
Шлунок	$q = C_0 \cdot 0,672(0,971\exp(-\lambda_1 t) + 0,0271\exp(-\lambda_2 t) + 0,0019\exp(-\lambda_3 t)); t \geq 0$	$\lambda_1 = 4,6206; \lambda_2 = 0,3681;$ $\lambda_3 = 0,0155$	$T_{\text{еф}1} = 0,15;$ $T_{\text{еф}2} = 1,88;$ $T_{\text{еф}3} = 44,7$
Усе тіло	$q = C_0 (0,2\exp(-\lambda_1 t) + 0,8\exp(-\lambda_2 t)); t \geq 0$	$\lambda_1 = 1,386;$ $\lambda_2 = 0,03938;$	$T_{\text{еф}1} = 0,5;$ $T_{\text{еф}2} = 17,6$

Вважали, що активність цезію при одноразовому надходженні становила 100 кБк, а при тривалому надходженні до організму – 10 кБк/добу. Результати розрахунку доз наведено у таблицях 5 і 6. Вони переконливо свідчать про переваги застосування багатокамерних моделей. Це, у першу чергу, можливість визначати дози опромінення окремих органів та тканин. Крім цього, підвищується точність їх визначення. Спрощені моделі дають занижені результати в початкові терміни опромінення (до 10 – 15 діб) і завищені – у більш віддалені терміни (понад 30 діб), причому зі збільшенням терміну тривалого надходження ізотопу або терміну після його одноразового введення похибка зростає.

Застосування багатокамерних моделей дає змогу не лише коректно визначати поглинені дози, але й розраховувати для лабораторних тварин ефективні дози, що до цих пір не було можливим.

Висновки

1. Для коректного описування кінетики цезію в організмі лабораторних щурів доцільно застосовувати багатокамерну модель, яка має очевидні переваги перед однокамерною. Це, по-перше, можливість коректного визначення поглинених доз в окремих органах та тканинах, по-друге, можливість застосування до лабораторних тварин поняття ефективної дози.

2. Запропоновано структурну схему 11-камерної моделі обміну ^{137}Cs в організмі лабораторних щурів. Описано кінетику радіонукліда в органах і тканинах за допомогою системи диференціальних рівнянь першого порядку.

3. Уперше експериментально визначено функції утримання ізотопу в різних органах та тканинах та значення біокінетичних констант для кожного органа у випадках одноразового та тривалого перорального надходження радіонукліда до організму.

4. Механізм усмоктування цезію у ШКТ, очевидно, залежить від режиму його надходження до організму. При одноразовому надходженні всмоктування відбувається переважно в шлунку, а при тривалому – у кишковикі.

5. Обмін цезію в організмі щурів при його тривалому надходженні суттєво прискорюється, повертаючись до висхідних показників після закінчення надходження ізотопу.

6. Виявлено, що цезій не повністю всмоктується в ШКТ у білих безпородних щурів, віком 8 - 11 міс. При одноразовому надходженні коефіцієнт всмоктування 70 %, а при тривалому – 55,3 %, що може суттєво впливати на процес формування доз внутрішнього опромінення.

7. Виконано порівняльні розрахунки доз опромінення органів і тканин у динаміці за різними моделями. Переваги застосування багатокамер-

Таблиця 5. Дози опромінення білих безпородних шурів при одноразовому пероральному надходженні 100 кБк ^{137}Cs , розраховані за різними моделями*

Орган чи тканина	Термін опромінення, доби															
	1				10				30				60			
	Багатокамерна модель		Доза на орган** Однокамерна, спрощена***	Доза на орган** Однокамерна, спрощена***	Багатокамерна модель		Доза на орган** Однокамерна, спрощена***	Багатокамерна модель		Доза на орган** Однокамерна, спрощена***	Багатокамерна модель		Доза на орган** Однокамерна, спрощена***			
	Доза на орган	Ефективна доза			Доза на орган	Ефективна доза		Доза на орган	Ефективна доза							
М'язи	0,0010	0,0011	0,013	0,015	0,030	0,027	0,030	0,040	0,038	0,037	0,033	0,028	0,050	-	0,019	
Шкіра	0,0004	0,0018	0,005	0,006	0,012	0,012	0,016	0,015	0,015							
Печінка	0,0004	0,0005	0,014	0,015	0,021	0,022	0,025	0,028	0,028							
Нирки	0,0083	0,0055	0,014	0,017	0,019	0,027	0,022	0,033	0,033							
Легені	0,0008	0,0010	0,008	0,008	0,013	0,014	0,016	0,016	0,016							
Селезінка	0,0016	0,0013	0,012	0,013	0,020	0,020	0,023	0,024	0,024							
Сім'яники	0,0013	0,0012	0,016	0,023	0,035	0,040	0,045	0,048	0,048							
Кишковик	0,0035	0,0098	0,028	0,038	0,040	0,056	0,067	0,067	0,067	0,037	0,033	0,028	0,050	-	0,019	
Сечовий міхур	0,0178	-	0,031	-	0,043	-	0,043	0,045	0,045							
Шлунок	0,0206	0,0123	0,021	0,016	0,021	0,017	0,021	0,021	0,021							

* Поглинені дози наведено в грехах; ефективні – у зівертах.

*** За експериментально визначеними значеннями біокінетичних констант.

*** Із використанням значень біокінетичних констант із літературних джерел.

Таблиця 6. Дози опромінення білих безпородних шурів при щоденному пероральному надходження 10 кБк ^{137}Cs , розраховані за різними моделями*

Орган чи тканина	Термін опромінення, доби									
	1		10		30		60		Однокамерна,**	
	Багатокамерна модель	Ефективна доза	Багатокамерна модель	Ефективна доза	Багатокамерна модель	Ефективна доза	Багатокамерна модель	Ефективна доза	Багатокамерна модель	Ефективна доза
М'язи	0,00008	0,00044	0,0062	0,0101	0,041	0,047	0,108	0,112	0,043	0,116
Шкіра	0,00003		0,0025		0,017		0,043			
Печінка	0,00004		0,0067		0,032		0,075			
Нирки	0,00054		0,0096		0,042		0,098			
Легені	0,00007		0,0039		0,021		0,050			
Селезінка	0,00016	0,00008	0,0074	0,0065	0,037	0,047	0,090	0,112	0,043	0,116
Сім'яники	0,00021		0,0114		0,061		0,150			
Кишковик	0,00160		0,0213		0,077		0,168			
Сечовий міхур	0,00131		0,0255		0,113		0,264			
Шлунок	0,00057		0,0065		0,020		0,042			

* Поглинені дози наведено в греях; ефективні – у зівертах.

** Із використанням значень біокінетичних констант із літературних даних.

ної моделі полягають у зменшенні похибки визначення доз та можливості їх розрахунків для кожного окремого органа чи тканини.

8. Застосування багатокамерної моделі впер-

ше в радіобіологічній практиці дало змогу визначати ефективні дози опромінення лабораторних тварин, що сприяє збільшенню вірогідності радіобіологічних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 336 с.
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 191 с.
3. Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. и др. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества / Под ред. Л. А. Ильина, В. А. Филова. - Л.: Химия, 1990. - 464 с.
4. Дрозд И.П. Восстановление параметров радиационной обстановки и дозовых нагрузок населения на территориях, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС (западный след): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - К., 1993. - 21 с.
5. Дрозд И.П., Липська А.І., Гриневич Ю.П., Мінчук Г.Я. Дослідження кінетики обміну ^{90}Sr + ^{90}Y та формування поглинутих доз при його одноразово-
- му надходженні до організму щурів у модельному експерименті // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 1 (9). - С. 97 - 105.
6. Дрозд И.П., Липська А.І., Алесіна М.Ю., Кучма М.Д. Експериментальне моделювання хронічного комбінованого (внутрішнього та зовнішнього) опромінення тварин // Вплив радіаційного фактора Чорнобильської зони відчуження на організм тварин / За ред. Я. І. Серкіза, М. Ю. Алесіної. - К: Атіка, 2006. - С. 8 - 26.
7. Дрозд И.П. Исследование зависимости периода полувыведения цезия от режима поступления в организм // Тез. докл. радиобиол. съезда, Киев, 20 - 25 сент. 1993 г. - Ч. I. - Пушино, 1993. - С. 320.
8. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. - М.: Медицина, 1985. - 288 с.

ОСОБЕННОСТИ ДОЗООБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОЗ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ПОСТУПЛЕНИИ ^{137}Cs В ОРГАНИЗМ ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС

А. И. Липская, И. П. Дрозд

Рассмотрена проблема дозобразования при пероральном поступлении ^{137}Cs в организм лабораторных крыс. Впервые экспериментально определены функции удержания изотопов в разных органах и тканях, значение биокинетических констант для отдельных органов при однократном и хроническом их поступлении в организм, а также выявлены некоторые характерные особенности биокинетики цезия. Для описания биокинетики радионуклида в организме предложена многокамерная модель. Обсуждаются преимущества применения данной модели для дозиметрии внутреннего облучения в сравнении с существующими моделями.

CHARACTERISTICS OF RADIATION DOSE ACCUMULATION AND METHODS OF DOSE CALCULATION FOR INTERNAL INFLOW OF ^{137}Cs INTO EXPERIMENTAL RATS' BODY

A. I. Lypska, I. P. Drozd

Problem of formation doses are considered at the peroral entering of ^{137}Cs in the organism of laboratory rats. First the functions of isotopes retention and values of biokinetic constants have been determined for different organs and tissues. Multicameral model for description of biokinetics of radionuclides in the organism is proposed. Advantages of application of this model for estimation of absorbed doses are discussed in comparison to existent models.

Надійшла до редакції 23.03.08,
після доопрацювання – 15.04.08.