Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять
з дисципліни «Радіоекологія»
(частина «Радіобіологія»)
для студентів спеціальності
G1 «Хімічні технології та інженерія»

Харків 2026

Укладач Хоботова Е.Б.
Кафедра хімії та хімічної технології

Затверджено
Методичною Радою ХНАДУ,
протокол № 2 від 25.11.2025

ВСТУП

Радіобіологія – це наука про біологічну дію іонізуючих випромінювань. Основними її завданнями є дослідження різних засобів захисту організму від випромінювань і шляхів його радіаційного для пострадіаційного відновлення від променевих пошкоджень, прогнозування небезпеки для людства рівня радіації навколишнього середовища, що підвищується, пошук нових шляхів використання іонізуючих випромінювань в медицині, мікробіологічній, харчовій промисловості і в сільському господарстві.

Мета методичних вказівок – допомогти студентам засвоїти практичні частину матеріала за темами дисципліни: «Міграція штучних радіонуклідів по трофічних рівнях», «Прогнозування вірогідного рівня радіаційного забруднення», «Кількісна оцінка радіочутливості», «Відносна біологічна ефективність іонізуючих випромінювань», «Кількісна оцінка комбінованої дії радіації і інших чинників», «Дозові межі опромінювання. Допустимі і контрольні рівні як основа радіаційної безпеки», «Виведення радіонуклідів з організму». Велика увага приділяється набуттю вміння розв’язувати завдання різного рівня складності по цих темах.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ МІГРАЦІЇ ШТУЧНИХ РАДІОНУКЛІДІВ ПО ТРОФІЧНИХ РІВНЯХ

Теоретична частина

Вироблений ряд кількісних характеристик, що застосовуються для оцінки переходу радіонуклідів по трофічних рівнях. Опишемо основні з них.

Вміст радіонукліда – це кількість радіонукліда у всьому органі, його виражають в долях Кі на орган.

Концентрація – це кількість радіонукліда у масовій частині органу, виражається в мкКі/кг сирої тканини.

Кратність накопичення F (КН) рівна відношенню кількості радіонукліда на трофічному рівні до його кількості на попередньому рівні:

$$F = \frac{q_n}{q_{n-1}} = \frac{C_n \cdot m_n}{C_{n-1} \cdot m_{n-1}}.$$

Розглянемо перехід радіонукліда з корму в організм тварини. При тривалому дозованому надходженні в організм з кормом радіонуклід накопичується в органі в кількості, кратній добовій дозі. Його вміст в органі виражають кратністю накопичення – величиною, що показує в скільки разів вміст радіонукліда в органі перевищує дозу, що щодоби вводиться, або яку частину останньою вона складає:

$$F = \frac{C_{\text{р}} \cdot m}{q},$$

де: $C_{\text{р}}$ – концентрація радіонукліда в органі, мкКі/кг;
m – маса органу, кг;
q – кількість радіонукліда, що щодня поступає в організм, мкКі.

Межа допустимого вмісту радіонукліда (А) в раціоні тварин:

$$A = \frac{C_{\text{сер}} m}{F}, \text{ мкКі,}$$

де: $C_{\text{сер}}$ – середня допустима концентрація радіонукліда в харчовому продукті, пКі/кг;

m – маса продукту (м'язова або кісткова тканина), кг;

F – КН в скелеті або м'язах.

Коефіцієнт концентрації (накопичення) (КК) застосовується для оцінки накопичення радіонуклідів в природних умовах. КК – це відношення концентрацій радіонукліда на трофічному рівні до його концентрації на попередньому рівні:

$$\text{КК} = \frac{C_n}{C_{n-1}}.$$

Для тварин, визначаючи КК, зазвичай співвідносять концентрацію радіонукліда в критичному органі тварини до його концентрації в їжі. Концентрація радіонукліда в рослинах, як правило, вище аналогічною для ґрунту, отже, КК > 1.

На підставі КК можна судити про закономірності міграції елементів по трофічних рівнях, а по характеру накопичення радіоактивних елементів наземними тваринами їх можна підрозділити на три зоогеохімічні групи.

Накопичувачі містять елемент, що вивчається, в більшій концентрації, чим в харчовому субстраті (КК > 1);

Розсіювачи містять елемент в однаковій з харчовим субстратом концентрації (КК ≈ 1);

Очищувачі містять елемент в меншій концентрації, чим харчовий субстрат (КК < 1), і сприяють «очищенню» харчового ланцюга від досліджуваного елементу.

Відзначимо, що при міграції радіонуклідів по трофічних рівнях великий вплив на концентрацію їх в органах і тканинах надають ізотопні і неізотопні носії.

Ізотопний носій – це стабільний ізотоп даного елементу, хімічні властивості якого тотожні його радіоактивному ізотопу. Наприклад, стабільний ^{31}P і радіоактивний ^{32}P.

Неізотопний носій – це стабільний ізотоп хімічного аналога елементу, який лише аналогічний по групових хімічних властивостях радіонукліду. Наприклад, Ca – носій по відношенню до $^{89, 90}$Sr; K – по відношенню до $^{134, 137}$Cs. Оскільки ці елементи близькі за своїми хімічними властивостями, то вони беруть участь в одних і тих же обмінних процесах. Тому ввели поняття про стронцієву і цезієву одиниці.

Стронцієва одиниця – це відношення вмісту в зразку ^{90}Sr, вираженого в пКі, до маси в цьому зразку Са в г. Або 1 пКі ^{90}Sr на 1 г Са рівний с.о.

Цезієва одиниця – це відношення активності ^{137}Cs в пКі до маси К в г. Або 1 ц.о. = 1 пКі ^{137}Cs на 1 г К.

У певних ситуаціях між цими ізотопами існують і конкурентні відносини. Наприклад, переважне засвоєння Са в збиток ^{90}Sr або відносне більше виведення ^{90}Sr з організму, чим Са.

Тому ^{90}Sr в скелеті тварини відкладається в іншому співвідношенні, чим Са. Кальцій при переході з кормів в органи тварини, як би захищає організм від ^{90}Sr, тобто відбувається його утиск, дискримінація. Зрозуміло, що при переході з ґрунту в рослини дискримінація радіонуклідів відчутна, при листовому засвоєнні – практично відсутня.

Коефіцієнт дискримінації – це величина, що показує, наскільки зміниться вміст ^{90}Sr або ^{137}Cs по відношенню до Са або К під час переходу їх на подальший трофічний рівень, наприклад, з ґрунту в рослину:

$$К_д = \frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\Big\}_n : \frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\Big\}_{n-1},$$

де: $К_д$ – коефіцієнт дискримінації;

C – концентрація елементу.

Чим менше $К_д$, тим більше виражена дискримінація.

Іноді замість $К_д$ вживають поняття «спостережуване відношення». Його використовують для характеристики сумарного впливу дискримінаційних актів, наприклад, на відрізку міграційного ланцюга від ґрунту до тварині:

$$СВ = (К_д)_1(К_д)_2 \ldots (К_д)_n.$$

Зворотна величина СВ названа *захисним коефіцієнтом* $К_з$:

$$К_з = \frac{1}{СВ}$$

Він характеризує ступінь зниження відносного вмісту радіонукліда при його пересуванні по міграційних шляхах.

Пояснити ефект дискримінації можна на прикладі ланки «ґрунт – рослина». Sr міцніше фіксується в ґрунтах в порівнянні з Ca. Коефіцієнт дискримінації міняється залежно від ступеня насиченості ґрунту стабільним Кальцієм, виду рослин, періоду їх розвитку. Залежно від структури і типу ґрунту $К_{д\ Cs}$ коливається від 0,01 до 0,1. Для Sr – від 0,8 до 1,0. Вважають, що дискримінація Sr відсутня в тих випадках, коли ґрунт не містить надлишку іонів Ca. При попаданні ^{90}Sr в ґрунт в результаті виникнення реакцій між ним і ґрунтом з часом від 5 до 50% ^{90}Sr стає недоступним для рослин.

Явище дискримінації використовується на практиці. Інтенсивність накопичення радіоактивних речовин рослинами може бути зменшена при внесенні до ґрунту, що містить малі кількості стабільних аналогів, мінеральних добрив. Так, інтенсивність накопичення ^{90}Sr в рослинах зменшується при збагаченні ґрунту Кальцієм у вигляді вапна $Ca(OH)_2$, вапняку $CaCO_3$ і сахаратів Кальцію.

Для ^{137}Cs коефіцієнт дискримінації щодо Калію в ланцюзі їжа – тіло людини прийнятий рівним двом. При цьому величина $К_д$ не міняється залежно від дієти.

Приведемо значення $К_д$ для різних ланок харчових ланцюгів:

$$К_{д1} = \frac{^{137}Cs : калій\ рослин}{^{137}Cs : калій\ грунту} = 0{,}01;$$

$$К_{д2} = \frac{^{137}Cs : калій\ м'яса\ (молока)}{^{137}Cs : калій\ рослин} = 2;$$

$$К_{д3} = \frac{^{137}Cs : калій\ тіла\ людини}{^{137}Cs : калій\ м'яса\ (молока)} = 2;$$

$$К_{д4} = \frac{^{137}Cs : калій\ тіла\ людини}{^{137}Cs : калій\ росл.\ їжі} = 2.$$

Звідси, СВ для ланцюга ґрунт – рослина – тварина – людина складе СВ = 0,01·2·2 = 0,04, а для ланцюга ґрунт – рослинна їжа – людина СВ = 0,01·2= 0,02. За умови, що 50% ^{137}Cs надходить з рослинною їжею і 50% – з тваринною, СВ відповідатиме 0,03.

Комплексний показник (КП) дає можливість визначити накопичення ^{90}Sr в рослинах. При визначенні КП вміст Стронцію – 90 в мКі на 1 км^2 ділять на кількість обмінного Кальцію в мг-екв на 100 г ґрунту, після чого кількість стронцієвих одиниць в рослинах ділять на цю величину. Після перетворень рівняння приймає вигляд:

$$КП = \frac{\text{с.о. в рослинах} \cdot \text{Са мг} - \text{екв на 100 г грунту}}{\text{стронцій} - 90\ \text{мКі/км}^2}.$$

Визначення такого показника як КП було запропоноване В.М. Клечковським у 1969 р. Значення комплексного показника, експериментально визначеного в дослідах, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Величина КП для деяких видів сільськогосподарської продукції

Вид продукції	Середнє значення КП
Сіно: природних лугів	60
конюшини	15
люцерни	12
Силосні культури і солома зернових і зернобобових культур	14
Зерно злакових і зернобобових культур	9

Кількісні показники забруднення рослин при глобальних радіоактивних випаданнях. Глобальні радіоактивні випадання характеризуються тривалою дією, при цьому відбувається забруднення рослин по двох шляхах: кореневому і через атмосферні випадання. Надходження радіонуклідів в сільськогосподарську продукцію можна виразити співвідношенням:

$$C = К_г \cdot S + К_п \cdot d,$$

де: C – концентрація радіонукліда в рослинах;

S – кумулятивний вміст радіонуклідів в ґрунті;

D – інтенсивність випадань радіонукліда;

$К_г$ і $К_п$ – ґрунтовий і повітряний коефіцієнти пропорційності, що визначаються емпірично.

Величина $К_г$ різна для різних видів рослин і типів ґрунтів. $К_г$ для ^{90}Sr залежить від вмісту Са в ґрунті. $К_г$ визначають за формулою Клечковського-Архіпова, що зв'язує концентрацію радіонуклідів Sr в

рослинній продукції з щільністю забруднення ґрунту і вмістом стабільного Са в ґрунті і рослинності:

$$C = \frac{K \cdot \mathrm{Ca_р} \cdot S}{\mathrm{Ca_г}},$$

де:

$$\mathrm{К_г} = \frac{C}{S},$$

C – концентрація радіоактивного Sr в рослинному зразку (пКі/кг);

$\mathrm{Ca_р}$ – концентрація Са в рослинному зразку (г/кг сухої речовини);

S – щільність забруднення ґрунту радіостронцієм (мКі/км^2);

$\mathrm{Ca_г}$ – концентрація Са в ґрунті (міліграм – екв/ 100 г ґрунту);

K – коефіцієнт забруднення, що залежить від типу рослинності.

Дана формула дозволяє виразити ґрунтовий коефіцієнт $K_г$ у вигляді:

$$\mathrm{К_г} = \frac{\mathrm{Ca_р}}{\mathrm{Ca_г}} \cdot K.$$

Для оцінки величини $\mathrm{К_п}$ доцільно використовувати середньомісячну щільність випадань радіоізотопів протягом вегетаційного сезону. Для різних видів рослинності $\mathrm{К_п}$ визначають за співвідношенням:

$$\mathrm{К_п} = \frac{10^9 \cdot R \cdot n}{m},$$

де: R – частка випадань, що затримуються рослинністю, що займає одиницю площі, від кумулятивних випадань на цю одиницю площі з початку вегетації;

n – період експозиції (місяць);

m – запас біомаси зразка на одиницю площі в кг сухої речовини на км^2.

Приклади вирішення завдань

1. Визначити кратність накопичення, коефіцієнт концентрації і межу допустимого вмісту при накопиченні ^{90}Sr твариною, загальна маса скелета якого 28 кг Стронцій щодня поступає з рослинним

кормом масою 6 кг і середньою концентрацією радіонукліда 165 пКі/кг. Концентрація ^{90}Sr в кістковій тканині тварини 0,0085 мкКі/кг, а середня допустима його концентрація – 96 пКі/кг.

Дано:

$m_{ск}$=28 кг $m_{тр}$=6 кг $C_{ск}$=8,5· 10^{-3} мкКі/кг $C_{тр}$=165 пКі/кг $C_{ср}$=96 пКі/кг	Рішення: для розрахунку кратності накопичення F (КН) використовуємо відношення: $$F = \frac{C_n \cdot m_n}{C_{n-1} \cdot m_{n-1}}$$
Знайти: *F, КК, А*	

Оскільки в даному випадку радіонуклід ^{90}Sr переходить з трофічного рівня – трави на трофічний рівень – організм тварини (скелет), то можна записати, що:

$$F = \frac{C_{ск} \cdot m_{ск}}{C_{тр} \cdot m_{тр}} = \frac{q_{ск}}{q_{тр}},$$

$$F = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{6} \cdot 28}{165 \cdot 6} = 240.$$

Чисельник помножили на 10^6 для переведення одиниць вимірювання $C_{ск}$ в пКі/кг.

Для розрахунку коефіцієнта концентрації КК використовуємо відношення:

$$КК = \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{C_{ск}}{C_{тр}}$$

Звідси: $$КК = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{6}}{165} = 51{,}5$$

Оскільки значення КК > 1, то тварина відноситься до накопичувачів.

Розрахунок межі допустимого вмісту проводимо за формулою:

$$A = \frac{C_{\text{ср}} \cdot m_{\text{ск}}}{F} = \frac{96 \cdot 28}{240} = 11{,}2 \text{ пКі}.$$

Відповідь: F=240; КК=51,5; A=11,2·10^{-6} мкКі.

2. Визначить кратність накопичення і коефіцієнт концентрації під час надходження радіонукліда ^{131}I з ґрунту в рослину. При проведенні експерименту в масі ґрунту 1,5 кг була визначена концентрація ^{131}I 220 пКі/кг, а в зеленій траві масою 2 кг концентрація ^{131}I складала 16 пКі/г.

Дано:	Рішення:
$m_{\text{тр}}$ = 2 кг $m_{\text{г}}$ = 1,5 кг $C_{\text{тр}}$ = 0,16 пКі/г = 160 пКі/кг $C_{\text{г}}$ = 220 пКі/кг	Розрахунок кратності накопичення проводимо за формулою: $F = \frac{C_n \cdot m_n}{C_{n-1} \cdot m_{n-1}} = \frac{C_{\text{тр}} \cdot m_{\text{тр}}}{C_{\text{г}} \cdot m_{\text{г}}} = \frac{160 \cdot 2}{220 \cdot 1.5} = 0{,}97.$
Знайти: F, КК	

Розрахунок коефіцієнта концентрації проводимо за формулою:

$$\text{КК} = \frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{C_{\text{тр}}}{C_{\text{г}}} = \frac{0{,}16 \cdot 10^3}{220} = 0{,}73.$$

Значення КК менше одиниці, тому трав'яну рослинність можна віднести до очищувачів.

Відповідь: F = 0,97; КК = 0,73.

3. Для яких ланок харчового ланцюга дискримінація виражена сильніше, якщо експериментально визначені концентрації Cs (пКі/кг) і К (г/кг) наступні: $[\text{Cs}]_{\text{ґрунт}}$ = 26,6; $[\text{Cs}]_{\text{росл.}}$= 120; $[\text{Cs}]_{\text{м'язи людини}}$ = 17; $[\text{K}]_{\text{ґрунт}}$ = 0,4; $[\text{K}]_{\text{росл.}}$ = 30; $[\text{K}]_{\text{м'язи людини}}$ = 2,36;

Дано:	Рішення:
$[\text{Cs}]_{\text{п}}$ = 26,6 пКі/кг $[\text{K}]_{\text{п}}$ = 0,4 г/кг $[\text{Cs}]_{\text{р}}$ = 120 пКі/кг $[\text{K}]_{\text{р}}$ = 30 г/кг $[\text{Cs}]_{\text{м}}$ = 17пКі/кг $[\text{K}]_{\text{м}}$ = 2,36 г/кг	Цезій пересувається по харчовому ланцюгу грунт – рослина – людина, накопичуючись в кінцевій ланці – м'язовій тканині людини. Можна розрахувати два коефіцієнти дискримінації: $К_{д1}$ – для переходу Cs ґрунт – рослина і $К_{д2}$ – для переходу рослина –
Знайти: співвідношення $К_{д1}$ і $К_{д2}$	

м'язова тканина людини. Розрахунок $К_д$ проводимо за формулою:

$$К_д = \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_n \div \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_{n-1};$$

$$\text{Звідси: } К_{д_1} = \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_{росл.} \div \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_{грунт} = \left(\frac{120}{30}\right) \div \left(\frac{26,6}{0,4}\right) = 0,06;$$

$$К_{д_2} = \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_{м'язи} \div \left(\frac{C_{Cs}}{C_К}\right)_{росл.} = \left(\frac{17}{2,36}\right) \div \left(\frac{120}{30}\right) = 1,8.$$

Відповідь: Дискримінація Cs по відношенню до K виражена сильніше при переході з ґрунту в рослини.

4. Вкажіть напрямок зміни величини спостережуваного відношення і захисного коефіцієнта при пересуванні ^{90}Sr по харчових ланцюгах ґрунт – рослина – людина і ґрунт – рослина – м'ясо, молоко –людина, якщо вміст ^{90}Sr і Ca в ланках харчового ланцюга наступний:

	[Sr], пКі/кг	[Ca], г/кг
ґрунт	1,2	0,24
рослина	1,8	24
м’ясо, молоко	1,125	1,8
людина (кісткова тканина)	0,378	2,8

Дано:

$[Sr]_п = 1,2$ пКі/кг
$[Ca]_п = 0,24$ г/кг
$[Sr]_р = 1,8$ пКі/кг
$[Ca]_р = 24$ г/кг
$[Sr]_{м\text{-}м} = 0,125$ пКі/кг
$[Ca]_{м\text{-}м} = 1,8$ г/кг
$[Sr]_{люд} = 0,378$ пКі/кг
$[Ca]_{люд} = 2,8$ г/кг

Знайти: відносини $СВ_1$ і $СВ_2$; $К_{з1}$ і $К_{з2}$

Рішення: Позначимо коефіцієнти дискримінації по ланках харчового ланцюга:

(I) ґрунт – $К_{д1}$ рослина – $К_{д2}$ людина

(I) ґрунт –$К_{д1}$ рослина –$К_{д3}$ м'ясо, молоко – $К_{д4}$ людина.

Передбачається, що тварина і людина споживають один і той же вид рослинності, вирощеної на однотипному ґрунті з однаковим рівнем забруднення ^{90}Sr.

Спостережувані відносини виражатимуться як

$СВ_1 = К_{д1} \cdot К_{д2}$

$СВ_2 = К_{д1} \cdot К_{д3} \cdot К_{д4}$

Розрахуємо величини $К_д$:

$$К_{д_1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_р \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_г = \left(\frac{1,8}{24}\right) \div \left(\frac{1,2}{0,24}\right) = 0,015;$$

$$К_{д_2} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{люд} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_р = \left(\frac{0,378}{2,8}\right) \div \left(\frac{1,8}{24}\right) = 1,8;$$

$$К_{д_1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{м-м} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_р = \left(\frac{0,125}{1,8}\right) \div \left(\frac{1,8}{24}\right) = 0,92;$$

$$К_{д_1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{люд} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{м-м} = \left(\frac{0,378}{2,8}\right) \div \left(\frac{0,125}{1,8}\right) = 1,96.$$

Тоді:

$$СВ_1 = К_{д1} \cdot К_{д2} = 0,015 \cdot 1,8 = 0,027;$$

$$К_{з1} = \frac{1}{СВ_1} = \frac{1}{0,027} = 37$$

$$СВ_2 = К_{д1} \cdot К_{д3} \cdot К_{д4} = 0,015 \cdot 0,92 \cdot 1,96 = 0,027;$$

$$К_{з2} = \frac{1}{СВ_2} = \frac{1}{0,027} = 37$$

Величини СВ і $К_з$ не змінилися, оскільки при розрахунку було зроблено допущення, що тип ґрунту і вид рослинності для живлення людини і тварини залишаються однаковими.

Відповідь: СВ і $К_з$ не змінилися.

5. У скільки разів зміниться величина спостережуваного відношення і захисного коефіцієнта при пересуванні Стронцію-90 по харчових ланцюгах: (I) $грунт_1$ – $рослина_1$ – людина; (II) $грунт_2$ – $рослина_2$ – м'ясо, молоко – людина, якщо вміст ^{90}Sr і Ca в ланках харчового ланцюга наступний:

	[Sr], пКі/кг	[Ca], г/кг
грунт$_1$	1,8	0,2
грунт$_2$	3,9	0,11
рослина$_1$	2,1	18
рослина$_2$	15,2	14,7
м'ясо-молоко	0,18	1,1
людина (кісткова тканина)	0,45	4,1

Дано:

$[Sr]_{г1} = 1,8$ пКі/кг
$[Ca]_{г1} = 0,2$ г/кг
$[Sr]_{г2} = 3,9$ пКі/кг
$[Ca]_{г2} = 0,11$ г/кг
$[Sr]_{р1} = 2,1$ пКі/кг
$[Ca]_{р1} = 18$ г/кг
$[Sr]_{р2} = 15,2$ пКі/кг
$[Ca]_{р2} = 14,7$ г/кг
$[Sr]_{м\text{-}м} = 0,18$ пКі/кг
$[Ca]_{м\text{-}м} = 1,1$ г/кг
$[Sr]_{люд} = 0,45$ пКі/кг
$[Ca]_{люд} = 4,1$ г/кг

Знайти: відношення $СВ_1$, $СВ_2$ і $К_{з1}$, $К_{з2}$

Рішення:

Позначимо коефіцієнти дискримінації згідно ланкам харчових ланцюгів:

(I) грунт$_1$ – $К_{д1}$ рослина$_1$ – $К_{д2}$ людина;

(II) грунт$_2$ – $К_{д3}$ рослина$_2$ – $К_{д4}$ м'ясо, молоко – $К_{д5}$ людина.

Тоді СВ дорівнює:

$$СВ_1 = К_{д1} \cdot К_{д2}$$

$$СВ_2 = К_{д3} \cdot К_{д4} \cdot К_{д5}.$$

Знайдемо значення коефіцієнтів дискримінації:

$$К_{д_1} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{р_1} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{г_1} = \left(\frac{2,1}{18}\right) \div \left(\frac{1,8}{0,2}\right) = 0,013;$$

$$К_{д_2} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{люд} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{р_1} = \left(\frac{0,45}{4,1}\right) \div \left(\frac{2,1}{18}\right) = 0,94;$$

$$К_{д_3} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{р_2} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{г_2} = \left(\frac{15,2}{14,7}\right) \div \left(\frac{3,9}{0,11}\right) = 0,03;$$

$$К_{д_4} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{м-м} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{р_2} = \left(\frac{0,18}{1,1}\right) \div \left(\frac{15,2}{14,7}\right) = 0,16;$$

$$К_{д_5} = \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{люд} \div \left(\frac{C_{Sr}}{C_{Ca}}\right)_{м-м} = \left(\frac{0,45}{4,1}\right) \div \left(\frac{0,18}{1,1}\right) = 0,67;$$

Тоді: $СВ_1 = К_{д1} \cdot К_{д2} = 0,013 \cdot 0,94 = 0,012;$

$СВ_2 = К_{д3} \cdot К_{д4} \cdot К_{д5} = 0,03 \cdot 0,16 \cdot 0,67 = 0,0032.$

$\frac{СВ_1}{СВ_2} = \frac{0,012}{0,0032} = 3,75,$ тобто при переході з рослинної дієти на м'ясо молочні продукти спостережуване відношення зменшилося у 3,75 рази.

Захисний коефіцієнт розраховуємо за формулою:

$$К_з = \frac{1}{СВ}.$$

Звідси: $$К_{з_1} = \frac{1}{СВ_1} = \frac{1}{0,012} = 83,3;$$

$$К_{з_2} = \frac{1}{СВ_2} = \frac{1}{0,0032} = 312,5.$$

Оскільки величина $К_{з_2}$ більша, ніж $К_{з_1}$, то можна зробити висновок, що ступінь зниження відносного вмісту ^{90}Sr при його пересуванні за другим харчовим ланцюгом вище, ніж за першим.

Відноше $$\frac{К_{з_1}}{К_{з_2}} = \frac{83,3}{312,5} = 0,27.$$

Відповідь: $\frac{СВ_1}{СВ_2} = 3,75;$ $\frac{К_{з_1}}{К_{з_2}} = 0,27.$

6. Визначить загальні величини СВ для ^{90}Sr і ^{137}Cs, якщо людина споживає на добу 43% м'ясо-молочної продукції, а останнє – рослинна їжа. Величини коефіцієнтів дискримінації для ланок харчового ланцюга рівні:

	Sr	Cs
ґрунт – рослина, $К_{д1}$	0,95	0,02
рослина – людина, $К_{д2}$	1,80	1,95

рослина – м'ясо, молоко, $К_{д3}$	1,78	2,0
м'ясо, молоко – людина, $К_{д4}$	2,2	1,87

Дано:
$К_{д1Sr} = 0,95$
$К_{д2Sr} = 1,8$
$К_{д3Sr} = 1,78$
$К_{д4Sr} = 2,2$
$К_{д1Cs} = 0,02$
$К_{д2Cs} = 1,95$
$К_{д3Cs} = 2,0$
$К_{д4Cs} = 1,87$

Знайти: $СВ_{Sr}$, $СВ_{Cs}$

Рішення: Розпишемо два харчові ланцюги з вказівкою коефіцієнтів дискримінації

(I) ґрунт – $К_{д1}$ рослина – $К_{д2}$ людина

(II) ґрунт – $К_{д1}$ рослина – $К_{д3}$ м'ясо, молоко –$К_{д4}$ людина.

Тоді:

$$СВ_{1_{Sr}} = \left(К_{д_1} \cdot К_{д_2}\right)_{Sr} = 0,95 \cdot 1,8 = 1,71;$$

$$СВ_{1_{Cs}} = \left(К_{д_1} \cdot К_{д_2}\right)_{Cs} = 0,02 \cdot 1,95 = 0,039;$$

$$СВ_{2_{Sr}} = \left(К_{д_1} \cdot К_{д_3} \cdot К_{д_4}\right)_{Sr} = 0,95 \cdot 1,78 \cdot 2,2 = 3,72;$$

$$СВ_{2_{Cs}} = \left(К_{д_1} \cdot К_{д_3} \cdot К_{д_4}\right)_{Cs} = 0,02 \cdot 2 \cdot 1,87 = 0,075;$$

Загальна величина СВ може бути знайдена, виходячи із співвідношення дієт людини за формулою:

$$СВ = \sum N_i \cdot СВ_i ,$$

де: $СВ_i$ – СВ для певного харчовго ланцюга;

N_i – частка продуктів харчування даного харчового ланцюга в раціоні людини.

Тоді: $СВ_{Sr} = N_1 \cdot СВ_1 + N_2 \cdot СВ_2 = 0,57 \cdot 1,71 + 0,43 \cdot 3,72 = 1,7;$

$$СВ_{Cs} = N_1 \cdot СВ_1 + N_2 \cdot СВ_2 = 0,57 \cdot 0,039 + 0,43 \cdot 0,075 = 0,054.$$

Для Цезію дискримінаційні акти виражені сильніше, ніж для Стронцію.

Відповідь: $СВ_{Sr} = 1,7$; $СВ_{Cs} = 0,054$.

7. Порівняйте накопичення ^{90}Sr в сіні конюшини і соломі зернобобових культур, якщо в ґрунті міститься ^{90}Sr 29 мКі/км^2 і 8,5 мг-екв Са/100 г ґрунту.

Дано:
$КП_к = 15$

Рішення: Значення комплексних показників (КП)

КП $_{\text{солома зернобоб.}}$ = 14 $[Sr]_г$ = 29 мКі/км^2 $[Ca]_г$ = 8,5 мг-екв/100 г ґрунту	для сіна конюшини і соломи зернобобових узяті з таблиці 1. Величина КП визначається як: $$КП = \frac{(с.о.)_{росл}[Ca]_г}{[Sr]_г},$$
Знайти: стронцієві одиниці(с.о.) в сіні конюшини і соломі зернобобових культур	

тоді рівень забруднення рослинної продукції (с.о.) можна виразити таким чином:

$$(с.о.)_{росл} = \frac{КП \cdot [Sr]_г}{[Ca]_г}$$

$$(с.о.)_к = \frac{15 \cdot 29}{8{,}5} = 51{,}2 \text{ с.о.}$$

$$(с.о.)_{зерн.сол.} = \frac{14 \cdot 29}{8{,}5} = 47{,}8 \text{ с.о.}$$

Таким чином, ступінь забруднення конюшини вищий, ніж зернобобових культур.

Відповідь: 51,2 с.о.; 47,8 с.о.

8. Розрахуйте концентрацію ^{90}Sr в рослинному зразку, якщо надходження радіонукліда здійснювалося через ґрунт, щільність забруднення якої радіостронцієм складає 0,09 мКі/км^2. Вміст Кальцію в ґрунті 0,12 мг-екв/100 г ґрунту, в рослинній продукції – 21 г/кг. Коефіцієнт забруднення даної рослинності рівний 0,37.

Дано: S = 0,09 мКі/км^2 $[Ca]_п$ = 0,12 мг-екв/100 г ґрунту $[Ca]_р$ = 21 г/кг K = 0,37	Рішення: Надходження ^{90}Sr в сільськогосподарську продукцію можна виразити співвідношенням: $$C_{Sr} = К_г \cdot S + К_п \cdot d,$$
Знайти: C_{Sr}	

якщо реалізується ґрунтовий шлях міграції Стронцію через кореневу систему і повітряний шлях через відкладення на листі. У даному випадку ^{90}Sr поступає тільки через коріння рослини, тому:

$$C_{Sr} = К_г \cdot S.$$

Ґрунтовий коефіцієнт $К_г$ можна визначити за формулою Архіпова-Клечковського:

$$К_г = \frac{[Ca]_р}{[Ca]_г} \cdot K,$$

тоді:
$$C_{Sr} = \frac{[Ca]_р \cdot K \cdot S}{[Ca]_г} = \frac{21 \cdot 0{,}37 \cdot 0{,}09}{0{,}12} = 5{,}8 \text{ пКі/кг}$$

Відповідь: 5,8 пКі/кг.

9. Розрахуйте концентрацію ^{90}Sr в рослинному зразку, якщо в результаті глобальних місячних випадань з інтенсивністю $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ пКі/доб·км^2 щільність забруднення ґрунту радіостронцієм склала 0,16 мКі/км^2, а засвоєння Кальцію рослинами почало складати 18 г/кг проти 1,3 мг-екв Са/100 г ґрунту при частці випадань, що затримуються рослинністю на 1 км^2 0,001 і коефіцієнті забруднення для природних лугів 0,85. З 1 км^2 лугу отримують 20 т сухої рослинної біомаси.

Дано:

S = 0,16 мКі/км^2

$[Ca]_р$ = 18 г/кг

$[Ca]_г$ = 1,3 мг-екв/100 г ґрунту

K = 0,85

n = 30 діб

d = $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ пКі/доб · км^2

R = 10^{-3}

m = 20000 кг/км^2

Знайти: C_{Sr}

Рішення:

Надходження ^{90}Sr в сільськогосподарську продукцію при глобальному забрудненні можна розрахувати за рівнянням:

$$C_{Sr} = К_г \cdot S + К_п \cdot d.$$

Враховуючи розрахункові формули для ґрунтового ($К_г$) і повітряного ($К_п$) коефіцієнтів, можна провести розрахунок за загальним рівнянням:

$$C_{Sr} = \frac{[Ca]_р \cdot K \cdot S}{[Ca]_г} + \frac{10^9 \cdot R \cdot n \cdot d}{m} = \frac{18 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}16}{1{,}3} + \frac{10^9 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^3} =$$

$$= 1{,}88 + 1{,}8 = 3{,}68 \text{ пКі/кг}$$

Відповідь: 3,68 пКі/кг.

Завдання для самоконтролю

1. Визначить кратність накопичення і коефіцієнт концентрації Йоду-131 в щитовидній залозі людини (20 г), якщо Йод щодня надходить з водою об'ємом 1,8 л і середньою концентрацією радіонукліда 88 пКі/л. Концентрація ^{131}I в тканині щитовидної залози дорівнює 0,0016 мкКі/кг. (Відповідь: $К_н$ = 0,2; $К_к$ = 18,2).

2. При переході на яку ланку харчового ланцюга дискримінація ^{90}Sr по відношенню до Са виражена сильніше, якщо експериментальні дані наступні: $[Sr]_{ґрунт}$ = 18,2 пКі/кг; $[Sr]_{рослини}$ = 165 пКі/кг; $[Sr]_{організм\ тварини}$ = 10,8 пКі/кг; $[Sr]_{організм\ людини}$ = 9,5 пКі/кг; $[Ca]_{ґрунт}$ = 2,6 г/кг; $[Ca]_{рослини}$ = 24,5 г/кг; $[Ca]_{організм\ тварини}$ = 105 г/кг; $[Ca]_{організм\ людини}$ = 68,7 г/кг?

(Відповідь: понад усе дискримінація Sr відчувається під час переходу «рослини – організм тварини» ($К_{д2}$ = 0,015). Найменше при переході «організм тварини – людина» ($К_{д3}$ = 1,34). Проміжний ступінь дискримінації під час переходу «ґрунт − рослини» ($К_{д1}$ = = 0,96)).

3. Визначить загальну величину спостережуваного відношення для Цезію-137, якщо людина споживає на добу 59% рослинної їжі, а останнє – м'ясо-молочна продукція. Коефіцієнти дискримінації Цезію по відношенню до Калію для ланок харчових ланцюгів рівні:

ґрунт – рослини, $К_{д1}$	0,015
рослина – людина, $К_{д2}$	2,01
рослина – м'ясо, молоко, $К_{д3}$	1,80
м'ясо, молоко – людина, $К_{д4}$	1,92

Відповідь: $СВ_{Cs}$ = 0,039.

4. Розрахуйте накопичення Стронцію-90 в сіні люцерни і силосі зернових культур, якщо в ґрунті міститься ^{90}Sr 1,8 мКі/км^2 і Са – 12,8

мг-екв/100 г ґрунту. Відповідь: (с.о.)$_{\text{люцерна}}$ = 1,68 с.о.; (с.о.)$_{\text{силос зерн}}$ = 1,96 с.о.

5. Надходження ^{90}Sr в рослини здійснюється через листове відкладення. Розрахуйте концентрацію радіостронцію в рослинній масі, якщо за два тижні опадів інтенсивність випадань склала $9{,}6\cdot10^{-4}$ пКі/доб·км^2, частка випадань, що затримуються рослинністю $9{,}3\cdot10^{-5}$. З 1 км^2 площі лугу отримують 32 т сухої рослинної біомаси. Відповідь: $C_{\text{Sr}} = 3{,}9\cdot10^{-2}$ пКі/кг.

РОЗДІЛ 2. ПРОГНОЗУВАННЯ ВІРОГІДНОГО РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ

Теоретична частина

Рівень забруднення ґрунту. Кількість радіоактивних ізотопів Cs, Sr, I, що осіли на поверхню ґрунту, розраховується за рівнянням:

$$A = \frac{0{,}693\cdot E\cdot Y}{T\cdot D\cdot C\cdot P},$$

де: A – щільність радіоактивного забруднення ґрунту ізотопами, пКі/м^2;

$E = 1{,}43\cdot10^{23}$ – число ділень ^{235}U на 1 кг;

Y – частка ізотопу при діленні %;

T – період напіврозпаду, доб;

$D = 3{,}2\cdot10^3$ – кількість розпадів в добу, відповідно 1 пКі;

$C = 10^6$ м^2/км^2;

$P = 11{,}7\cdot10^4$ мР/год на 1 кг/км^2 на висоті 1 м над землею у момент t + 24.

Вірогідний рівень концентрації радіонукліда в тканинах рослини в будь-який термін після випадання можна оцінити за допомогою наступного рівняння:

$$P_t = P_0\cdot e^{-\lambda_p t},$$

де: P_t – концентрація радіонукліда в рослині, пКі/г сухої речовини;

P_0 – початкова концентрація радіонукліда в рослині;

$\lambda_р = \frac{0{,}693}{T_р}$; $T_р = T_{еф}$ напіввиведення ізотопу з рослини: для ^{89}Sr $\lambda_р$ = 18 діб; для ^{131}I $\lambda_р$ = 5,5 діб;

t – дні після випадання радіоактивних речовин.

Концентрація ^{89}Sr в кістковій тканині травоїдних тварин:

$$A_к = P_0 \cdot \frac{Q_р \cdot f_{Sr}(K_1 + K_2)}{Q_к},$$

де: $A_к$ – питома активність кісткової золи, пКі/г золи;

$Q_р$ – маса корму тварини за добу, г;

$Q_к$ – маса золи кісток однієї тварини, г;

f_{Sr} – частка ^{89}Sr, що поглинутий і відкладений в критичній тканині (органі). Для людини f_{Sr} = 0,03. Для великої рогатої худоби f_{Sr} = 0,01.

$\lambda_к = \frac{0{,}693}{T_к}$, де $T_к = T_{еф}$ напіввиведення ^{89}Sr з кістки: для кролика $T_к$= 20 діб; для великої рогатої худоби $T_к$ = 52 доби; для людини $T_к$ = 50,4 дні.

$$K_1 = \frac{e^{-\lambda_р t}}{\lambda_к - \lambda_р}; \qquad K_2 = \frac{e^{-\lambda_к t}}{\lambda_р - \lambda_к}$$

Концентрація йоду в щитовидній залозі тварин може бути знайдена за рівнянням:

$$A_q = P_0 \cdot Q_р \cdot f_q(K_3 + K_4),$$

де: A_q – вміст ^{131}I у всій щитовидній залозі при $t > 0$, пКі;

f_q – частка ^{131}I, що поглинутий і відкладений в щитовидній залозі: для людини f_q = 0,2; для великої рогатої худоби f_q = 0,4; для свині f_q = 0,2; для овець f_q = 0,1.

$$K_3 = \frac{e^{-\lambda_р t}}{\lambda_q - \lambda_р}; \; K_4 = \frac{e^{-\lambda_q t}}{\lambda_р - \lambda_q}; \; \lambda_q = \frac{0{,}693}{T_q}$$

де: $T_q = T_{еф\ I}$ для щитовидної залози.

Вірогідний ступінь забруднення молока корів, що випасаються на сліді радіоактивної хмари, ізотопами ^{90}S, ^{137}Cs, ^{131}I:

$$L_t = P_0 \cdot N_L \cdot f_L\left(K_5 + K_6\right),$$

де: L_t – питома активність молока, пКі/мл;

N_L – відношення маси сухого корму, що з'їдається за день, до добового об'єму молока, г/мл. Зазвичай N_L = 1,4 г/мл·доб;

f_L – частка ізотопу, що виділяється з молоком корови, від його загальної кількості, що потрапила в тіло. Для Sr f_L = 0,02; для I f_L = 0,01 – 0,06;

$\lambda_L = \dfrac{0{,}693}{T_м}$, де: $T_м = T_{еф}$ зниження концентрації ізотопу в молоці корів. Для ^{89}Sr T_L = 2,5 дня; для ^{131}I T_L = 2 дні.

$$K_5 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{\lambda_t - \lambda_p}; \qquad K_6 = \frac{e^{-\lambda_L t}}{\lambda_p - \lambda_L}.$$

Вміст ^{89}Sr, ^{137}Cs, ^{131}I в критичних тканинах людини, що вживає молоко:

$$A_t = P_0 \cdot N_L \cdot f_L \cdot N_t \cdot f_t\left(K_7 + K_8 + K_9\right),$$

де: A_t – питома активність тканини або критичного органу людини, пКі/г;

N_t – відношення об'єму молока, споживаного в добу, до маси органу або тканини людини, мл/г·добу: для дітей N_t ^{89}Sr = 0,14 мл/г добу; N_t ^{131}I = 500 мл/г·добу; для дорослих N_t ^{89}Sr = 0,14 мл/г·добу; N_t ^{131}I = 50 мл/г·добу;

f_t – частка нукліда, що поглинутий і відкладений в тканині або критичному органі людини: для ^{89}Sr f_t = 0,21; для ^{131}I f_t = 0,30;

$\lambda_t = \dfrac{0{,}693}{T_{еф}}$, де $T_{еф}$ – ефективний період напіввиведення ізотопу з критичного органу людини: для ^{89}Sr $T_{еф}$ = 50,4 дня; для ^{131}I $T_{еф}$ = 7,5 дня;

$$K_7 = \frac{e^{-\lambda_p t}}{(\lambda_L - \lambda_p)\cdot(\lambda_t - \lambda_p)}; \qquad K_8 = \frac{e^{-\lambda_L T}}{(\lambda_p - \lambda_L)\cdot(\lambda_t - \lambda_L)};$$

$$K_9 = \frac{e^{-\lambda t}}{(\lambda_p - \lambda_t)\cdot(\lambda_L - \lambda_t)}$$

Для зручності користування в практичних цілях цими математичними моделями доцільно побудувати номограми, для яких, задаючись певними початковими параметрами (P_0), можна побудувати криві, що відображають весь хід змін концентрації радіонуклідів в біосубстратах в часі. Результати такого розрахунку, в якому було прийнято, що початкова щільність забруднення рослин P_0^{87}Sr = 100 пКі/г, P_0^{131}I = 400 пКі/г, представлені на номограмах мал. 1 і 2. Для інших значень P_0 відповідні величини P_t, L_t, A_t і A_q пропорційно видозмінюватимуться. При використанні тих же характеристик ефективних періодів напіввиведення, але інших значень N_L, N_t, f_L і f_t виходитимуть величини, пропорційно великі або менші приведених на номограмах значень L_t і A_t.

Приклади вирішення завдань

1. Розрахуйте концентрацію ^{89}Sr в пасовищних трав'янистих рослинах через 80 діб після радіоактивного випадання, якщо початкова концентрація ^{89}Sr в рослинах 131 пКі/г.

Дано: t=80 діб P_0=131 пКі/г Знайти: P_t	Рішення: За номограмою (рис. 2) визначимо рівень забруднення Стронцієм при початковій концентрації P_0 = 100

пКі/г. Для цього відновимо перпендикуляр з точки t = 80 діб до перетину з кривою P_t, потім опустимо перпендикуляр на вісь lgP_t. Значення lgP_t лежить між 3 і 4. Для точнішого його визначення проведемо лінійну інтерполяцію. На великомасштабній номограмі одна одиниця lgP_t відповідає 21,8 см, тоді:

$$21{,}8 \text{ см} - 1$$

$$14{,}7\text{см} - x$$

або: $$x = \frac{14{,}7 \cdot 1}{21{,}8} = 0{,}67.$$

Звідси: $$\lg P_t = 3 + 0{,}67 = 3{,}67.$$

(При використанні номограми іншого масштабу пропорція міняється, а саме пропорційно зменшуються значення 21,8 см і 14,7 см).

Знаходимо P_t за значенням антилогарифму:

$$P_t = 10^{3{,}67} = 4677{,}4 \text{ пКі/кг}.$$

Розмірність P_t вказана на осі OY.

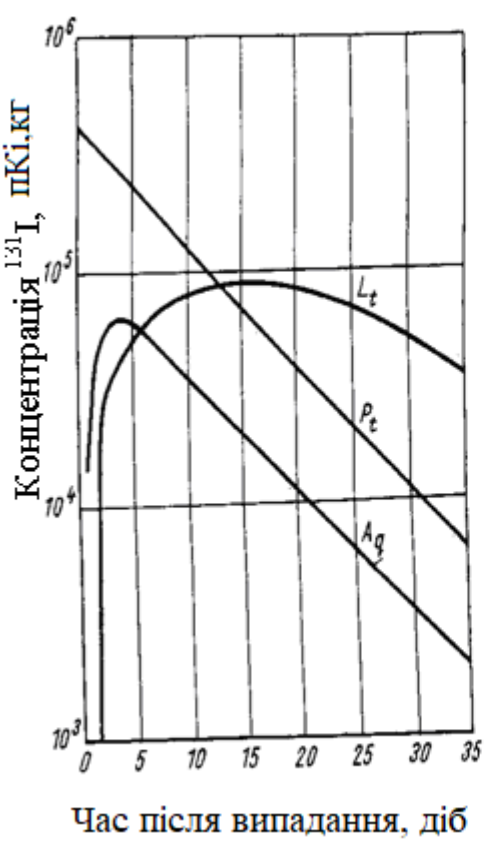
Номограма побудована для значення P_0 = 100 пКі/кг, в нашому випадку P_t пропорційно змінюється:

$$P_t' = P_t \cdot \frac{P_0'}{P_0} = 4677{,}4 \cdot \frac{131}{100} = 6127{,}4 \text{ пКі/кг}.$$

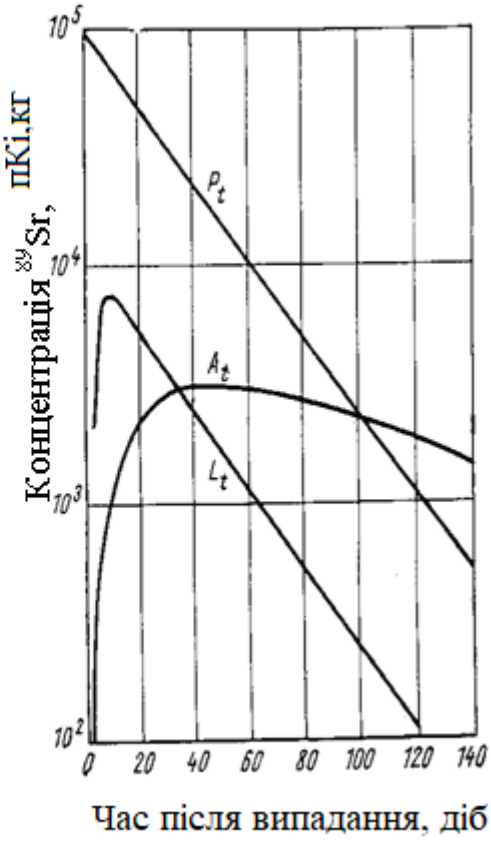
Відповідь: 6127,4 пКі/кг.

2. Встановіть вірогідний ступінь забруднення молока корів радіойодом через 30 діб після радіоактивного забруднення при початковій концентрації ^{131}I в рослинах пасовища 418 пКі/г і значенні відношення маси сухого корму, що з'їдається за день, до сухого об'єму молока 1,19 г/мл·добу.

Дано: t = 30 діб P_0' = 418 пКі/г N_L' = 1,19 г/мл·добу Знайти: L_t'	Рішення: За номограмою (рис. 1) визначимо рівень забруднення молока Йодом-131 через 30 діб при початковій концентрації радіонукліда 400 пКі/г. При опусканні перпендикуляра на вісь OY набуваємо значення $\lg L_t$ між 4 і 5.



1



2

Рис. 1. Можливі концентрації ^{131}I в пасовищних рослинах, в молоці корів та в щитовидній залозі людини: P_t – концентрація ^{131}I в траві, пКі/кг; L_t – концентрація ^{131}I в молоці, пКі/л; A_q – вміст ^{131}I в щитовидній залозі людини, пКі; P_0 = 400 пКі/г; N_t = 50 мл/г·діб; N_L= 1,4 г/мл·ді

Рис. 2. Можливі концентрації ^{89}Sr рослин в пасовищних рослинах, в молоці корів і в скелеті людини: P_t – концентрація ^{89}Sr в траві, пКі/кг; L_t – концентрація ^{89}Sr в молоці, пКі/л на 10 літрів; A_t – вміст ^{89}Sr в скелеті людини, пКі; P_0 = 100 пКі/г; N_t = 0,14 мл/г·діб; N_L = 1,4 г/мл·діб

Точне значення дає лінійна інтерполяція: $\lg L_t = 4{,}75$. Звідси:

$$L_t = 10^{4{,}75} = 56234 \text{ пКі/кг}.$$

Значення L_t, отримане за номограмою, уточнюємо:

$$L_t' = L_t \cdot \frac{P_0'}{P_0} \cdot \frac{N_L'}{N_L} = 56234 \cdot \frac{418}{400} \cdot \frac{1{,}19}{1{,}4} = 49950 \text{ пКі/кг}.$$

Відповідь: 49950 пКі/кг.

3. Розрахуйте концентрацію радіойоду в тканині щитовидної залози людини через 10 діб після радіоактивного випадання при концентрації ^{131}I в пасовищній траві в початковий момент часу 378 пКі/г і значеннях коефіцієнтів $N_L' = 1{,}52$ і $N_t' = 0{,}12$.

Дано:	Рішення: За номограмою (рис.1) визначаємо значення A_q для періоду часу 10 діб при початковому рівні забруднення трави 400 пКі/г:
$t_1 = 10$ діб $P_0' = 378$ пКі/г $N_L' = 1{,}52$ $N_t' = 0{,}12$	$\lg A_q = 4{,}58$, звідси: $A_q = 10^{4{,}58} = 38019$ пКі/кг.
Знайти: A_q'	

Пропорційно змінимо значення A_q:

$$A_q' = A_q \cdot \frac{P_0'}{P_0} \cdot \frac{N_L'}{N_L} \cdot \frac{N_t'}{N_t} = 38019 \cdot \frac{378}{400} \cdot \frac{1{,}52}{1{,}4} \cdot \frac{0{,}12}{0{,}14} = 33435 \text{ пКі/кг.}$$

Відповідь: 33435 пКі/кг.

Завдання для самоконтролю

1. Розрахуйте концентрацію ^{131}I в пасовищній траві через 25 діб після радіоактивного викиду, якщо в початковий момент часу концентрація Йоду в рослинах складала 344 пКі/г. Відповідь: 20630 пКі/кг.

2. Визначить рівень забруднення Стронцієм-89 кісткової тканини людини через 120 діб після радіоактивного випадання, якщо первинний рівень забруднення трави складає 125 пКі/г, а коефіцієнти N_L і N_t відповідно рівні 1,38; 0,22. Відповідь: 3070 пКі/кг.

РОЗДІЛ 3. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА РАДІОЧУТЛИВОСТІ

Теоретична частина

Радіочутливість відображає здатність живого об'єкту відповідати тією або іншою реакцією на дію іонізуючого випромінювання. Зворотне поняття – *радіорезистентність*. Радіочутливість виражається в одиницях

поглиненої енергії, здатної викликати спостережувану реакцію у певного відсотка популяції.

Кількісною характеристикою радіочутливості є доза радіації, що викликає загибель половини опромінених об'єктів протягом 30 діб після опромінення (середньолетальна доза – $ЛД_{50/30}$). Чим менше $ЛД_{50}$, тим вище радіочутливість.

$ЛД_{50/30}$ знаходять графічно, для цього використовують криві «Доза–ефект» (рис. 3). На осі абсцис відкладають дози випромінювання, а на осі ординат – відсоток загибелі за термін спостереження – 30 днів.

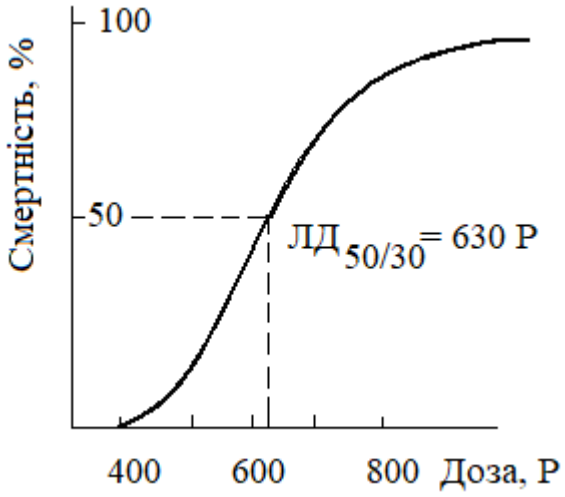


Рис. 3. Приклад визначення $ЛД_{50/30}$ за кривої смертності

Окрім $ЛД_{50/30}$ використовують і інші дози, що характеризують:

1) гостру дію $ЛД_{50/15}$, $ЛД_{50/30}$, $ЛД_{50/60}$;

2) підгостру дію $ЛД_{50/120}$, $ЛД_{50/240}$;

3) хронічнц дію $ЛД_{50/360}$, $ЛД_{50/620}$.

При цьому в чисельнику як і раніше указується кількість гинучих тварин (50%), а у знаменнику – термін, до якого вони гинуть.

$ЛД_{50/30}$ можна визначити і розрахунковим шляхом достатньо точно при невеликій кількості експериментальних тварин. Для цих цілей результати експерименту обробляють за допомогою формул Г.Н. Першина і Кербера.

Формула Г.Н. Першина:

$$ЛД_{50} = \frac{\sum(a+b)\cdot(m-n)}{200},$$

де: a і b – значення суміжних доз;

m і n – відповідні цим дозам частоти смертельних результатів, %.

Формула Кербера:

$$ЛД_{50} = ЛД_{100} - \frac{\sum zd}{n},$$

де: $ЛД_{100}$ – доза, що викликає загибель всіх піддослідних тварин;

d – інтервал між кожними двома суміжними дозами;

z – середнє арифметичне з числа загиблих тварин при випробуванні двох суміжних доз;

n – число тварин в кожній групі.

Для розрахунку $ЛД_{50/30}$ за даною формулою необхідно випробувати 4–5 значень доз, включаючи дозу, що не викликає ефекту, і дозу, що викликає загибель всіх експериментальних тварин.

Ще одним критерієм радіочутливості є D_0. Цей критерій може бути визначений графічно за кривими виживання (рис. 4) або смертності (рис. 5). Криві виживання різних клітин при дії щільноіонізуючих випромінювань мають однакову форму, аналогічну приведеній на рис. 4.

Графіки побудовані в напівлогарифмічних координатах: по осі абсцис дозу відкладають в лінійному масштабі, а по осі ординат виживання – в логарифмічному. Криві виживання самих різних клітин при дії рентгенівського, гамма- або будь-якого іншого рідкоіонізуючого випромінювання мають однакову форму, аналогічну приведеній на рис. 6. Крива складається з плеча і лінійної ділянки. При опроміненні щільноіонізуючими частинками криві виживання біосистем не мають плеча (рис. 4).

Розглянемо визначення основного параметру радіочутливості – величину D_0 або D_{37} на прикладі аналізу одноударної поразки. В якості цього мають на увазі загибель опроміненого об'єкту від одиничної іонізації в певній мішені (для щільноіонізуючих випромінювань).

Якщо n_0 – початкове число об'єктів, n – число об'єктів, не

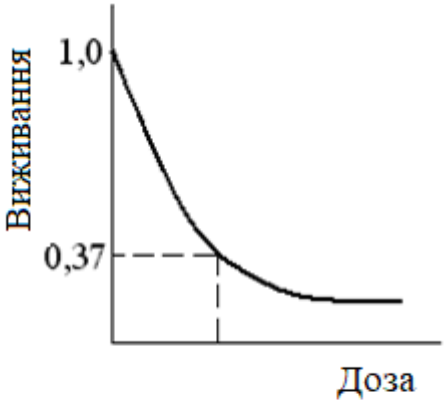


Рис. 4. Залежність зміни виживання від величини дози випромінювання

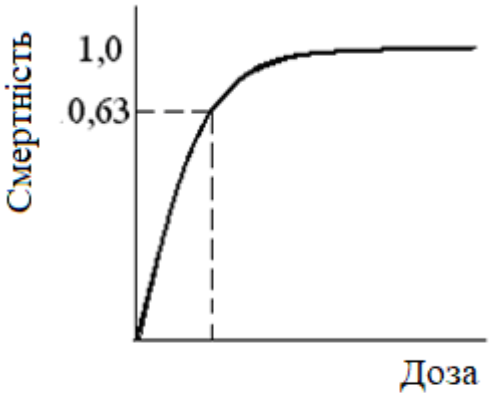


Рис. 5. Залежність кількості загиблих клітин від дози випромінювання

уражених дозою D, то вихід з ладу частки об'єктів $\frac{dn}{n_0}$ при прирості дози dD виражається рівнянням:

$$\frac{dn}{n_0} = -\frac{D}{D_0},$$

де: D_0 – доза, при якій на кожен об'єкт в середньому доводиться одне попадання.

Після інтеграції отримуємо:

$$\ln\frac{n}{n_0} = -\frac{D}{D_0} \qquad \text{або} \qquad n = n_0 \cdot e^{-\frac{D}{D_0}}.$$

Якщо на осі ординат відкладати значення відносного числа уражених об'єктів, то доза D_0 співпадає з дозою, що вражає 63,2% мішеней, оскільки, якщо $n = n_0$ і $D = D_0$, то $1 - e^{-1} = 0{,}632$.

Якщо на осі ординат відкладати число об'єктів, що вижили, то D_0 відповідатиме дозі, при якій виживає 36,8% ≈ 37% об'єктів, звідси назва 37%-на доза або D_{37}.

Криві, що мають плече, описуються рівнянням вигляду:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \left(1 - e^{-\frac{D}{D_0}}\right)^n,$$

де: n – екстраполяційне число, що визначають як значення ординати в місці її перетину екстрапольованою прямолінійною ділянкою кривої виживання.

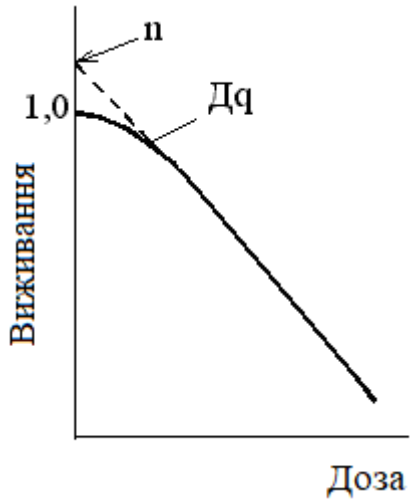


Рис. 6. Залежність виживання клітин від дози випромінювання

Плече на кривій виживання визначає здатність клітин відновлювати життєздатність шляхом репарації від частини променевого ураження. Мірою репараційної здатності клітин є величина плеча або квазіпорогова доза D_q (рис. 6). Вона відповідає точці перетину екстрапольованої прямолінійної ділянки кривою виживання з прямій, паралельній осі абсцис, проведеній на рівні 100-відсоткової виживаємості. При різкому зниженні відновної здатності, наприклад, при опроміненні потоком α–частинок, величини n і D_q значно зменшуються: n до 1, а D_q до 0 Гр.

Приклади вирішення завдань

1. Визначить $ЛД_{50/30}$ за формулою Першина, виходячи з експериментальних даних:

Введена доза, мКі/кг	Загибель піддослідних тварин %
1,2	0
2,0	20
3,2	40
4,0	60
5,5	80
6,4	100

Рішення: Доповнимо таблицю розрахунком суми суміжних доз ($a+b$) і різниці відповідних цим дозам частот смертельних, результатів ($m–n$) .

Д, мКі/кг	Загибель, %	$a+в$	$m-n$
1,2	0	3,2	20
2,0	20	5,2	20
3,2	40	7,2	20
4,0	60	9,5	20
5,5	80	11,9	20
6,4	100	–	–

Розрахуємо $ЛД_{50/30}$ за формулою Першина:

$$ЛД_{50} = \frac{\sum(a+b)\cdot(m-n)}{200} = \frac{20\cdot(3{,}2+5{,}2+7{,}2+9{,}5+11{,}9)}{200} = 3{,}7 \text{ мКі/кг}.$$

Відповідь: 3,7 мКі/кг.

2. Визначить $ЛД_{50}$ за формулою Першина, виходячи з експериментальних даних:

Введена доза $\cdot 10^{-6}$, Бк/кг	Загибель кліток, %
5,6	5
7,2	18
8,2	29
8,9	41
9,5	74
10,4	92

Рішення: Доповнимо таблицю розрахунком ($a+b$) і ($m–n$).

Д $\cdot 10^{-6}$, Бк/кг	Загибель, %	$(a+b)\cdot 10^{-6}$	$(m–n)$
5,6	5	12,8	13
7,2	18	15,4	11
8,2	29	17,1	12
8,9	41	18,4	33
9,5	74	19,9	18
10,4	92	–	–

Розрахуємо $ЛД_{50/30}$ за формулою Першина:

$$ЛД_{50/30} = \frac{\sum(a+b)\cdot(m-n)}{200} =$$

$$= \frac{(12{,}8\cdot 13+15{,}4\cdot 11+17{,}1\cdot 12+18{,}4\cdot 33+19{,}9\cdot 18)\cdot 10^6}{200} =$$

$$= \frac{(166{,}4+169{,}4+205{,}2+607{,}2+358{,}2)\cdot 10^6}{200} = 7{,}5\cdot 10^6 \text{ Бк/кг}$$

Відповідь: $7{,}5\cdot 10^6$ Бк/кг.

3. Розрахуйте $ЛД_{50}$ за формулою Кербера, виходячи з наступних експериментальних даних:

Доза, мКі/кг	Число тварин, що вижили	Число загиблих тварин
5,6	14	0
7,4	13	1
11,2	8	6
15,8	6	8
16,8	3	11
20,4	0	14

Рішення: Доповнимо таблицю розрахунком інтервалу між двома суміжними дозами, *d* і середнього арифметичного з числа загиблих тварин при випробуванні суміжних доз, *z*.

Д, мКі/кг	Число тварин, що вижили	Число загиблих тварин	*d*	*z*	*dz*
5,6	14	0	1,8	0,5	0,9
7,4	13	1	3,8	3,5	13,3
11,2	8	6	4,6	7	32,2
15,8	6	8	1,0	9,5	9,5
16,8	3	11	3,6	12,5	45
20,4	0	14			

Розрахуємо $ЛД_{50}$ за формулою Кербера:

$$ЛД_{50} = ЛД_{100} - \frac{\sum zd}{n}$$

де: $ЛД_{100} = 20{,}4$ мКі/кг; $n = 14$.

Тоді:

$$ЛД_{50} = 20{,}4 - \frac{0{,}9 + 13{,}3 + 32{,}2 + 9{,}5 + 45}{14} = 20{,}4 - \frac{100{,}9}{14} = 13{,}2 \text{ мКі/кг}$$

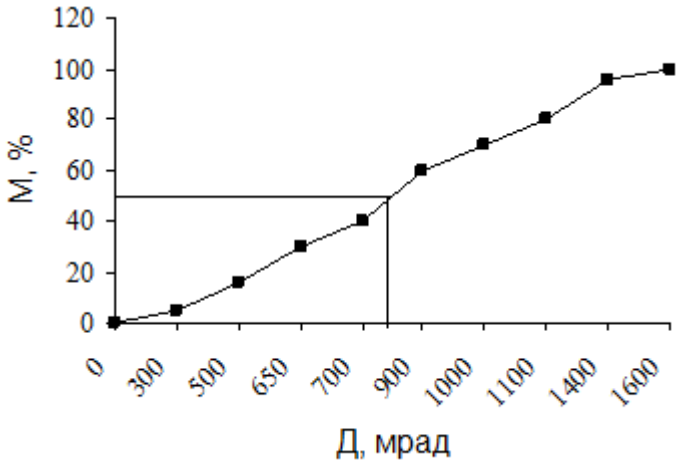
Відповідь: 13,2 мКі/кг.

4. Визначить $ЛД_{50}$, побудувавши графічну залежність «Ураженість−доза» згідно нижче приведеним даним.

Яку дію радіації характеризує визначена $ЛД_{50}$, якщо всі експериментальні дані отримані за інтервал часу 120 діб?

Доза, мрад	Смертність, М %
300	5
500	15,3
650	31
720	40
900	62
1000	70
1100	80
1400	97
1600	100

Рішення: Побудуємо графічну залежність М–Д. Згідно визначенню $ЛД_{50/120}$ – це доза, що викликає загибель 50% осіб за інтервал часу 120 діб. Встановимо перпендикуляр від осі М (від 50%) на криву. Від точки перетину опустимо перпендикуляр на вісь Д. $ЛД_{50/120}$ = 800 мрад. Доза $ЛД_{50/120}$ характеризує підгостру дію радіації.

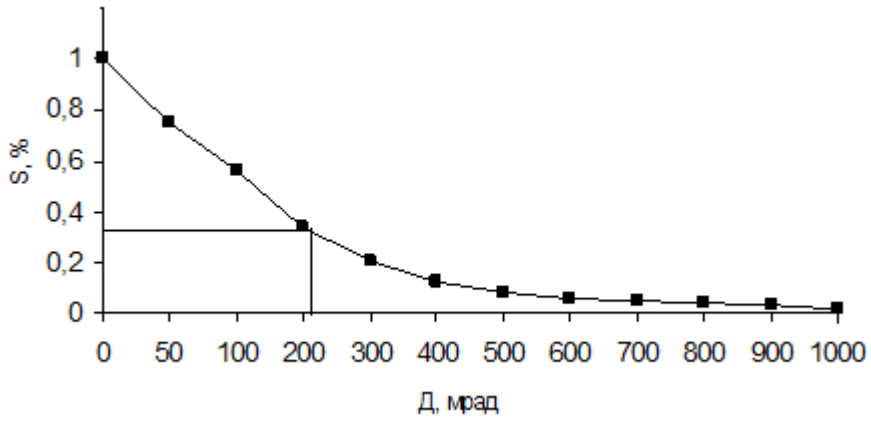


Відповідь: 0,8 рад.

5. Визначить $Д_0$ за кривою «Доза-ефект» згідно з експериментальними даними:

Доза, мрад	Виживання, *S* %
50	75
100	56,3
200	33,8
300	21,3
400	13,8
500	10,0
600	6,3
700	5,0
800	3,8
900	2,5
1000	1,9

Рішення: Побудуємо залежність «Доза-виживання». Доза $Д_0$ – показник радіочутливості клітинних культур, при якій виживає 37% (0,37) клітин. Для її визначення встановлюємо перпендикуляр від осі *S* (*S* = 0,37) до перетину з кривою, а потім опустимо перпендикуляр на вісь Д. Отримаємо $Д_0$ = 210 мрад.



Відповідь: 210 мрад.

Завдання для самоконтролю

1. Визначить $ЛД_{50}$ за формулою Першина, використовуючи експериментальні дані:

Доза, мКі/кг	% загибелі клітин
18,4	4
20,5	15
23,8	32
25,5	57
27,8	72
30,5	98

Відповідь: 23,6 мКі/кг.

2. Визначить $ЛД_{50}$ за формулою Кербера, використовуючи експериментальні дані:

Д, мКі/кг	Число клітин, що вижили	Число клітин, що загинули
11,2	120	0
12,8	89	31
15,5	75	45
20,5	66	54
25,4	28	92
30,0	0	120

Відповідь: 19,8 мКі/кг.

РОЗДІЛ 4. ВІДНОСНА БІОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ (ВБЕ)

Теоретична частина

Відносну біологічну ефективність дії іонізуючих випромінювань (ВБЕ) оцінюють порівнянням дози випромінювання, що викликає певний біологічний ефект, з дозою стандартного випромінювання, що обумовлює той же ефект. Як стандартне випромінювання використовують жорсткі рентгенівські промені з енергією 180–250 кеВ.

ВБЕ обчислюють за формулою:

$$ВБЕ = \frac{Д_{R_{0_{еф}}\ \text{рентгенівське випромінювання}}}{Д_{x_{еф}\ \ \text{випромінювання, що вивчають}}}.$$

ВБЕ залежить від:

– лінійної передачі енергії (ЛПЕ);
– величини і потужності дози;
– до- і пострадіаційних умов;
– наявності або відсутності кисню;
– режиму фракціонування.

ВБЕ збільшується при фракціонованому опроміненні. Це явище використовується при променевій терапії пухлин важкими ядерними частинками з великою ЛПЕ – нейтронами. Отже, один і той же ефект може бути досягнутий при фракціонованому опроміненні відносно меншими сумарними дозами, чим при одноразовому опроміненні.

Окремо зупинимося на чиннику часу (F_t), який визначається відношенням доз тривалого або дробового випромінювання (з різними потужностями доз) до дози короткочасного опромінення, що викликають один і той же біологічний ефект:

$$F_t = \frac{\text{доза дробного опромінення}}{\text{доза одноразового опромінення}}.$$

Чинник часу може бути різним залежно від площі опромінення, переважного опромінення якого-небудь органу, різних видів опромінення і так далі.

Чинник часу рівний одиниці, якщо тимчасовий розподіл дози не робить впливу або, якщо загальна доза випромінювання і при дії протягом тривалого часу може дати той же повний ефект. Чинник часу буде більше одиниці, якщо при тривалому часі опромінення потрібна велика доза для отримання того ж біологічного ефекту, який виникає при разовому опроміненні.

Приклад вирішення завдання

Одноразова доза γ-випромінювання невідомої енергії у 180 рад викликає загибель 40% щурів. Аналогічний ефект досягається при дії на експериментальну групу тварин рентгенівського опромінення в одноразовій дозі 340 рад (E = 220 кеВ). При фракціонуванні дози γ-випромінювання 40-відсоткова смертність щурів досягалася при дозі 108 рад. Розрахуйте ВБЕ і чинник часу.

Дано:	Рішення: При опромінюванні живих організмів експозиційна доза розраховується за рівнянням:
$Д_{R0}$ = 340 рад (одноpаз.) Д = 180 рад (одноpаз.) Д = 108 рад (фракціон.)	$Д_{експ} = 0,96 \cdot Д_{погл}$
Знайти: ВБЕ, F_t	

Звідси: $Д_{експ\ R0} = 0,96 \cdot 340 = 326,4$ Р (одноpаз.);

$Д_{експ} = 0,96 \cdot 180 = 172,8$ Р (одноpаз.);

$Д_{експ} = 0,96 \cdot 108 = 103,7$ Р (фракціонована).

Оскільки оцінку ВБЕ і F_t необхідно провести у момент припинення опромінення, а не через певний часовий інтервал, то можна вважати що величини ефективних доз рівні величинам експозиційних доз. ВБЕ обчислюють порівнянням доз двох випромінювань при одноразовій дії:

$$ВБЕ = \frac{Д_R}{Д_\gamma} = \frac{326,4}{172,8} = 1,89.$$

Чинник часу знаходять як відношення двох доз F_t при різних режимах дії:

$$F_t = \frac{Д_{\gamma еф.фракц.}}{Д_{\gamma еф.одноpаз.}} = \frac{103,7}{172,8} = 0,6.$$

Відповідь: ВБЕ = 1,89; F_t = 0,6.

Завдання для самоконтролю

Доза γ-випромінювання невідомої енергії у 165 рад при одноразовій дії викликає загибель 38% мишей. Аналогічний ефект досягається при дії на експериментальну групу тварин рентгенівського опромінення в одноразовій дозі 375 рад (E_{R0} = 190 кеВ). При фракціонуванні дози γ-випромінювання 38-відсоткова смертність щурів досягалася при дозі 120 рад. Розрахуйте ВБЕ і чинник часу. (Відповідь: ВБЕ = 2,3; F_t = 0,73).

РОЗДІЛ 5. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ РАДІАЦІЇ ТА ІНШИХ ЧИННИКІВ

Теоретична частина

У наше століття зростаючого забруднення навколишнього середовища біологічно активними речовинами (мутагенами, канцерогенами, отрутами) і фізичними агентами (короткими і ультракороткими радіохвилями, вібрацією, ультразвуком і іншими) проблема біологічної дії радіації і інших хімічних і фізичних чинників привертає велику увагу радіобіологів. Відкриваються можливості практичного використання іонізуючої радіації у поєднанні з іншими чинниками в медицині, біологічній технології, сільському господарстві.

Підкреслимо, що при одночасній дії іонізуючої радіації і іншого агента на біологічні об'єкти можливі три ситуації:

– агент знижує біологічну дію радіації, виявляється *інгібування*, тобто *антагонізм* дії;

– агент не міняє ефекту від радіації. Результат комбінованої дії рівний сумі дій радіації і другого агента, тобто виявляється *адитивність (сумація)* дії;

– агент підсилює дію радіації. У разі посилення дії радіації реєструється біологічний ефект, не спостережуваний при роздільній дії чинників в узятих дозах. Важливо пам'ятати, що в цьому випадку розрізняють 2 класи явищ залежно від властивостей другого агента:

– якщо другий агент сам викликає радіобіологічний ефект (наприклад, хімічні мутагени, канцерогени, тепло та інші), який посилюється при комбінованій дії і виявляється вищим адитивного, то говорять про *синергізм* або *потенціювання* дії;

– якщо другий агент не здатний сам по собі викликати спостережуваний ефект, але підсилює дію радіації, то явище носить назву *сенсибілізації*, а другий агент – сенсибілізатора.

На практиці ситуація зменшення дії радіації є хімічним захистом з використанням радіопротекторів або радіозахисних засобів. *Радіозахисні засоби* – це речовини, що полегшують тяжкість ураження людини або тварин іонізуючим випромінюванням. Вони зменшують

ефективну дозу радіації. Сам процес ослаблення ураження називається хімічним захистом.

Важливо знати кількісні критерії комбінованої дії радіації і інших чинників. Основними критеріями є *чинник зменшення дози* (ЧЗД) і *чинник зміни логарифма виживання* (ЧЗЛ). Приклади їх графічного визначення представлені на рис. 7, 8. ЧЗД рівний відношенню доз радіації, що надають однаковий біологічний ефект на організм, за наявності (D_2) і відсутності іншого агента (D_1):

$$\text{ЧЗД} = \frac{D_2}{D_1}.$$

При синергізмі дії ЧЗД менше одиниці. Взаємне розташування кривих lg$S$ – D: вище лежить крива при дії радіації (контроль).

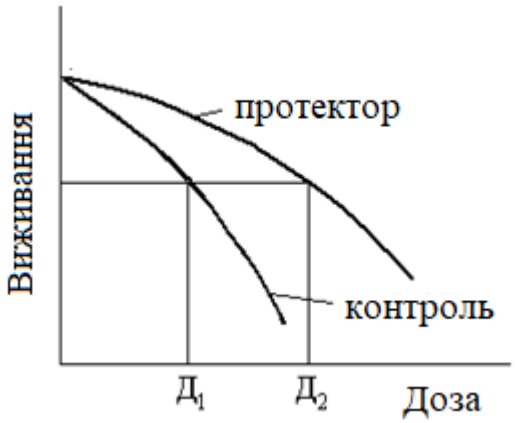


Рис. 7. Приклад визначення ЧЗД за кривою виживання

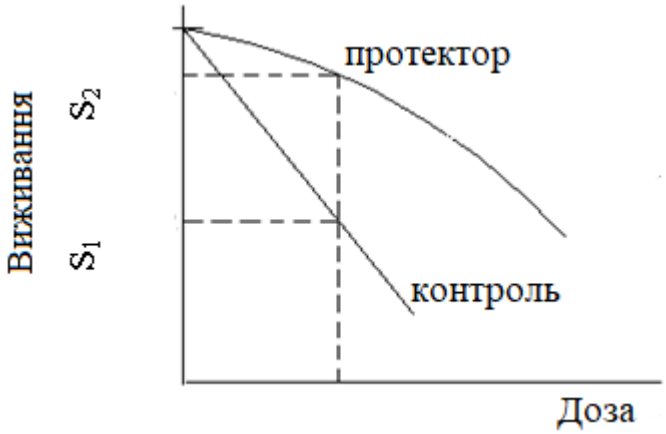


Рис. 8. Приклад визначення ЧЗЛ за кривою виживання

При адитивності дії ЧЗД рівний одиниці, криві співпадають один з одним. При антагонізмі дії ЧЗД більше одиниці, вище лежить крива комбінованої дії. На рис. 7 представлений приклад визначення ЧЗД у присутності радіопротектора. ЧЗД в таких випадках рівний 2–3.

Іншою кількісною характеристикою є чинник зміни логарифма виживання (ЧЗЛ):

$$\text{ЧЗЛ} = \ln\frac{S_1}{S_2} = 2{,}3\cdot\lg(S_1 - S_2),$$

де: S – виживання клітин.

При синергізмі дії ЧЗЛ більше нуля, при адитивності – рівний нулю, при антагонізмі дії – менше нуля. Приклад графічного визначення ЧЗЛ у присутності радіопротектора приведений на рис. 8. Третім кількісним критерієм дії радіопротекторів є коефіцієнт модифікації – відношення різниці між питомим ураженням (смертю) в контролі (тобто при дії радіації) і в досліді (тобто при комбінованій дії) до питомого ураження в контролі.

Крім того, використовують ще два критерії, які сильно залежать від величини доз, при яких проводиться оцінка, тому вони дають неточне уявлення про ступінь що модифікує, у тому числі і захисного, ефекту. Це:

– абсолютна величина різниці між показниками виживання в досліді (комбінована дія) і в контролі;

– індекс ефекту – відношення показників виживання в дослідній і контрольній групах.

Ці показники частіше використовуються для якісної оцінки наявності або відсутності захисного, або іншого модифікуючого ефекту.

Приклади вирішення завдань

1. Визначить характер комбінованої дії радіації і підвищеної температури згідно з приведеними експериментальними даними.

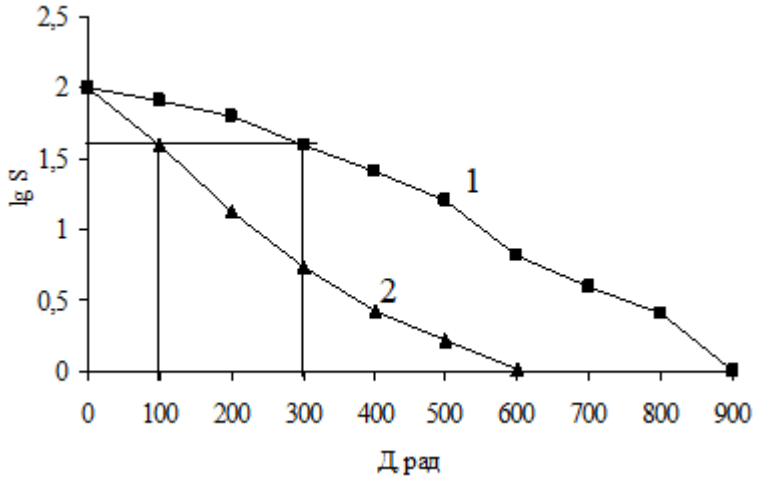
Оцініть комбіновану дію кількісно шляхом розрахунку ЧЗД при виживанні клітинних культур 40% і ЧЗЛ при дозі 500 рад.

Д, рад	Виживання при дії радіації (S_1, %) (у контролі)	Виживання при сумісній дії радіації і гіпертермії (S_2, %)
0	100	100
100	79	40
200	61	14
300	43,5	5
400	27,5	3
500	16	1,8
600	7,5	1,1
700	4,5	–
800	2,5	–
900	1	–

Рішення: Оцінка комбінованої дії проводиться шляхом побудови графічної залежності lg$S$ – Д. Для цього прологарифмуємо значення S_1 та S_2.

Д, рад	lgS_1	lgS_2
0	2	2
100	1,9	1,6
200	1,78	1,15
300	1,63	0,7
400	1,44	0,48
500	1,2	0,26
600	0,87	0,04
700	0,65	–
800	0,39	–
900	0	–

За виглядом графічної залежності характер комбінованої дії радіації і гіпертермії можна оцінити як синергізм. Розрахуємо кількісні характеристики комбінованої дії.

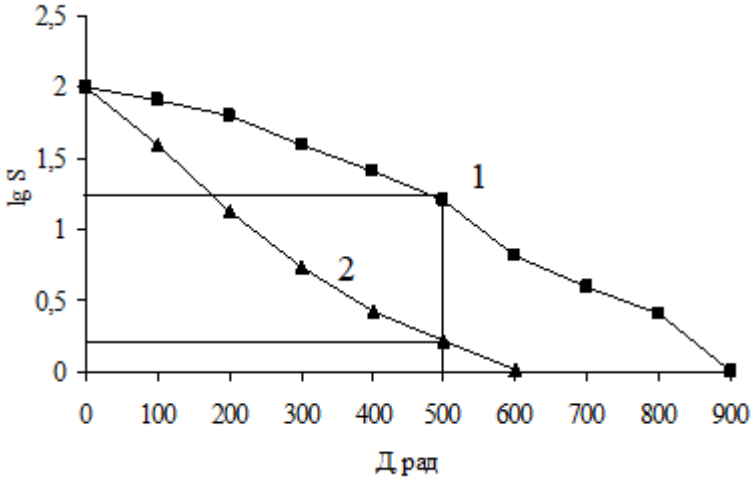


Розрахунок ЧЗД при S = 40% (lg$S$ = 1,6): графічно знаходимо $Д_1$ = 300 рад; $Д_2$ = 100 рад.

Звідси:
$$ЧЗД = \frac{Д_2}{Д_1} = \frac{100}{300} = 0{,}33.$$

Значення ЧЗД < 1, що підтверджує синергізм комбінованої дії.

Розрахунок ЧЗЛ при Д = 500 рад: графічно знаходимо lgS_1 = 1,25; lgS_2 = 0,20.



Звідси: $ЧЗЛ = 2,3(\lg S_1 – \lg S_2) = 2,3\cdot(1,25 – 0,20) = 2,41 > 0.$

Значення ЧЗЛ > 0, що підтверджує синергізм комбінованої дії.

Відповідь: синергізм комбінованої дії. ЧЗД = 0,33; ЧЗЛ = 2,41.

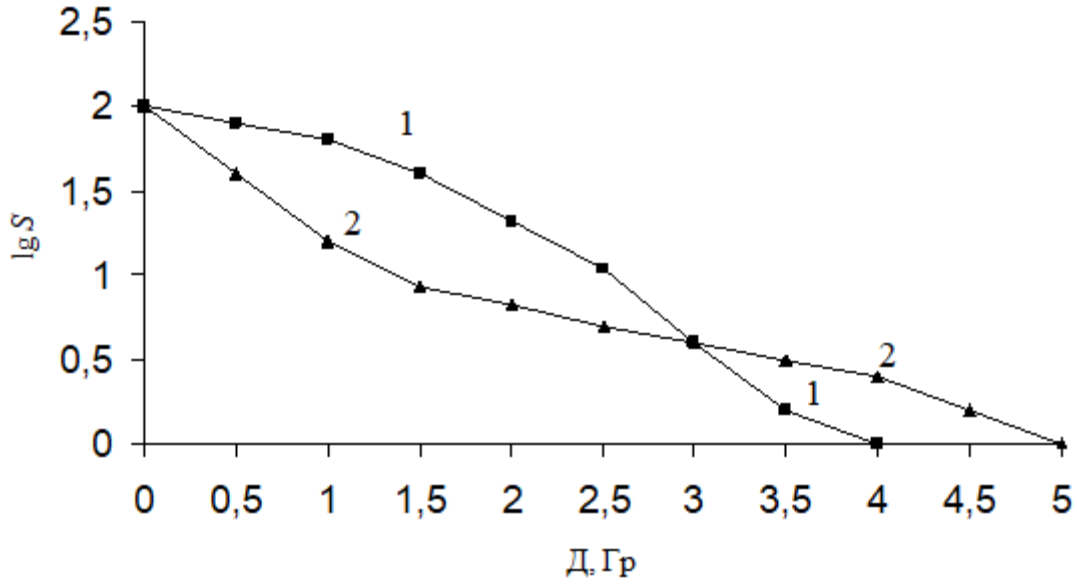
2. Визначить ЧЗД при 20% виживання і ЧЗЛ при дозі 3,5 Гр, використовуючи експериментальні дані. Визначить характер комбінованої дії радіації і хімічного агента.

Д, Гр	Виживання при дії радіації (S_1 %)	Виживання при дії радіації і хімічного агента (S_2,%)
0	100	100
0,5	79	40
1,0	60	16
1,5	40	9
2,0	23	7
2,5	12	5
3,0	4	4
3,5	1,6	3
4,0	1	2,4
4,5	–	1,6
5,0	–	1

Рішення: Побудуємо графічну залежність lg$S$−Д. Для цього прологарифмуємо значення S_1 і S_2.

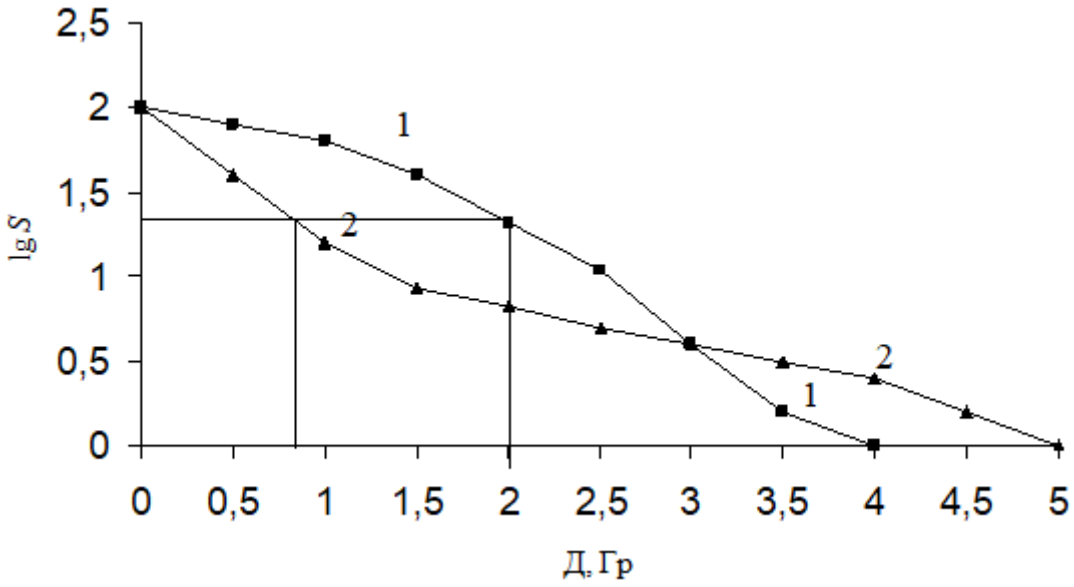
Д, рад	lgS_1	lgS_2
0	2,0	2,0
0,5	1,9	1,6
1,0	1,78	1,2
1,5	1,6	0,95
2,0	1,36	0,85
2,5	1,08	0,70
3,0	0,6	0,6
3,5	0,2	0,48
4,0	0	0,38
4,5	–	0,2
5,0	–	0

За виглядом графічної залежності характер комбінованої дії можна оцінити як перехідний. До дози 3 Гр спостерігається синергізм дії. У точці Д = 3 Гр спостерігається адитивність дії. При дозі більше 3 Гр спостерігається антагонізм дії. У результаті комбіновану дію можна оцінити як синерго-антагоністичну. Розрахуємо кількісні характеристики комбінованої дії.



Розрахунок ЧЗД при S = 20% (lgS = 1,3): графічно знаходимо $Д_1$=2,0 Гр; $Д_2$ = 0,8 Гр.

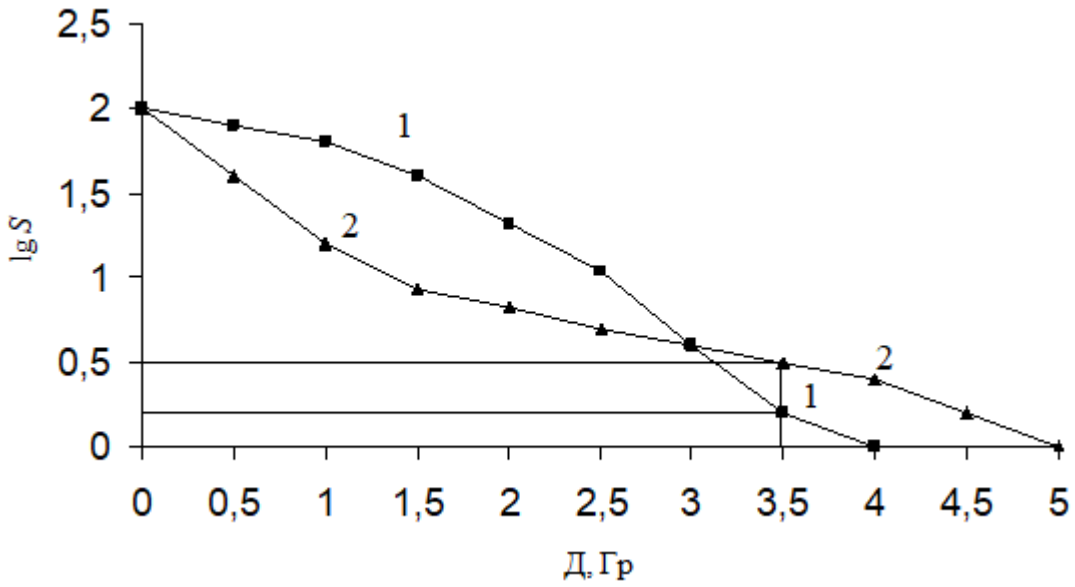
Звідси:
$$ЧЗД = \frac{Д_2}{Д_1} = \frac{0,8}{2,0} = 0,4.$$



Значення ЧЗД < 1, що підтверджує синергізм дії радіації і хімічного агентів області доз менше 3 Гр.

Розрахунок ЧЗЛ при Д = 3,5 Гр: графічно знаходимо $\lg S_1 = 0{,}2$; $\lg S_2 = 0{,}5$.

Звідси $\text{ЧЗЛ} = 2{,}3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2{,}3\cdot(0{,}2 - 0{,}5) = -0{,}69 < 0$.



Значення ЧЗЛ < 0 підтверджує прояв антагонізму дії в області доз більше 3 Гр.

Значення ЧЗД і ЧЗЛ, а також взаємне розташування кривих lgS_1 – Д свідчать про прояв значного синергізму в області доз менше 3 Гр, а потім про різку зміну характеру дії до явного антагонізму.

Відповідь: синерго-антагоністична дія ЧЗД = 0,4; ЧЗЛ = –0,69.

3. Визначить ЧЗД при 4% виживанні ЧЗЛ при дозі 500 рад, використовуючи експериментальні дані. Оцініть характер дії радіації і хімічного агента. Чи можна рекомендувати дану речовину до використання як радіопротектору з позицій ефективності радіаційного захисту?

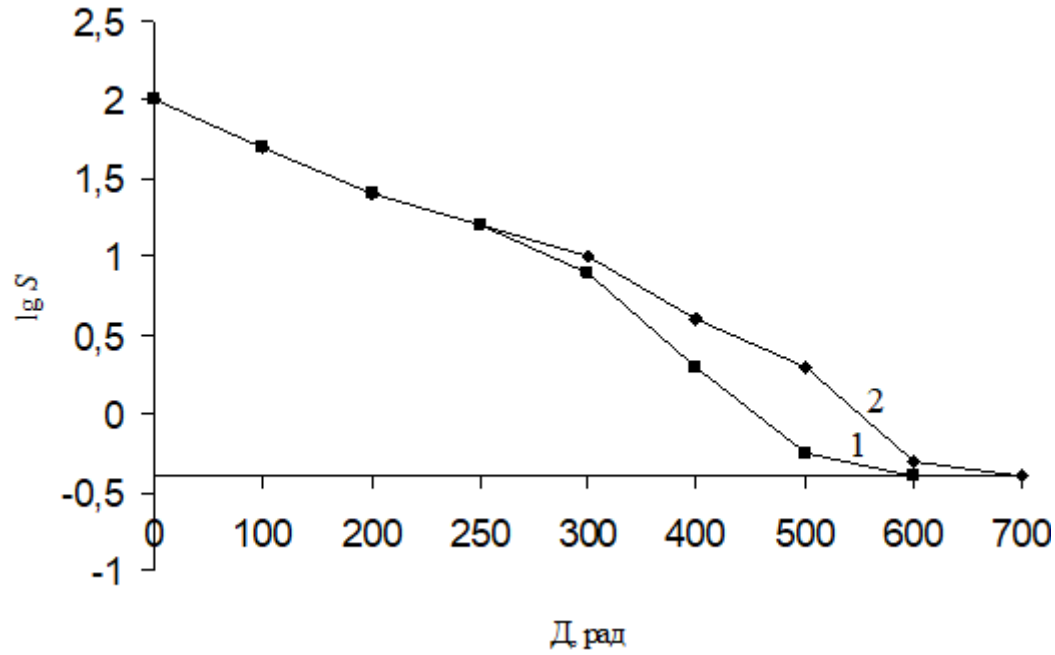
Д, рад	Виживання при дії радіації (S_1, %)	Виживання при дії радіації і хімічного агента (S_2, %)
0	100	100
100	48	48
200	24	24
250	16,5	16,5
300	8	10
400	1,9	4
500	0,5	2
550	0,4	–
600	–	0,5
700	–	0,4

Рішення: Побудуємо графічну залежність lg$S$–Д. Для цього прологарифмуємо значення S_1 і S_2.

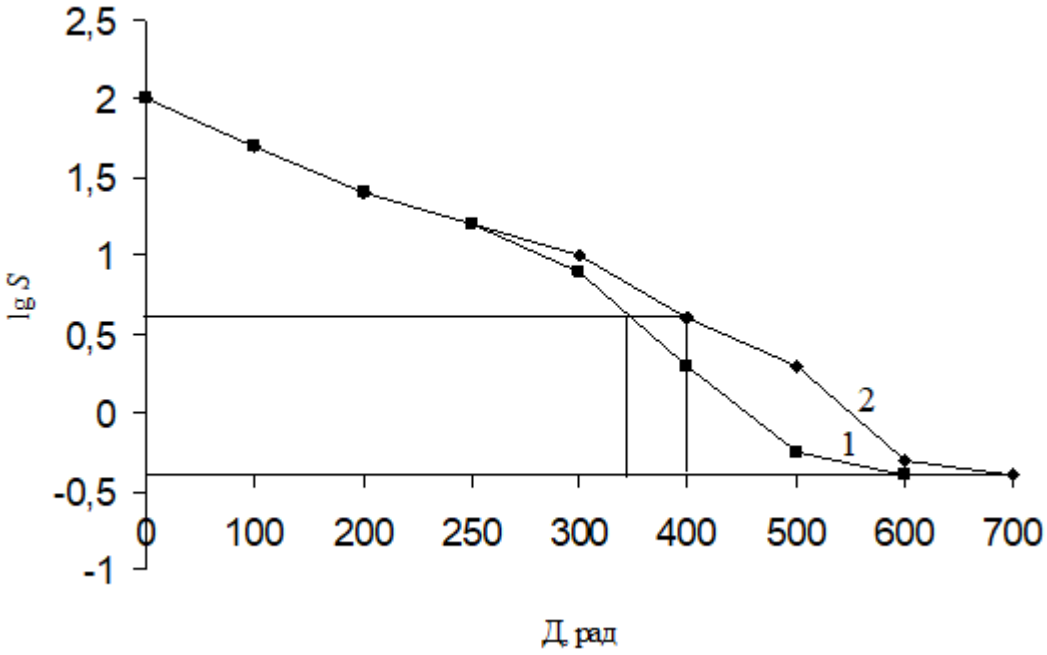
Д, рад	lgS_1	lg S_2
0	2,0	2,0
100	1,68	1,68
200	1,38	1,38
250	1,22	1,22
300	0,90	1,0
400	0,28	0,60
500	–0,30	0,30
550	–0,40	–
600	–	–0,30
700	–	–0,40

За виглядом залежності lg$S$–Д можна оцінити характер комбінованої дії радіації і хімічного об'єкту: до Д = 250 рад спостерігається адитивність дії. При дозах вище 250 рад

спостерігається антагонізм дії. Антагонізм виражений несильно, оскільки криві трохи розходяться. Оцінимо кількісно антагонізм дії.



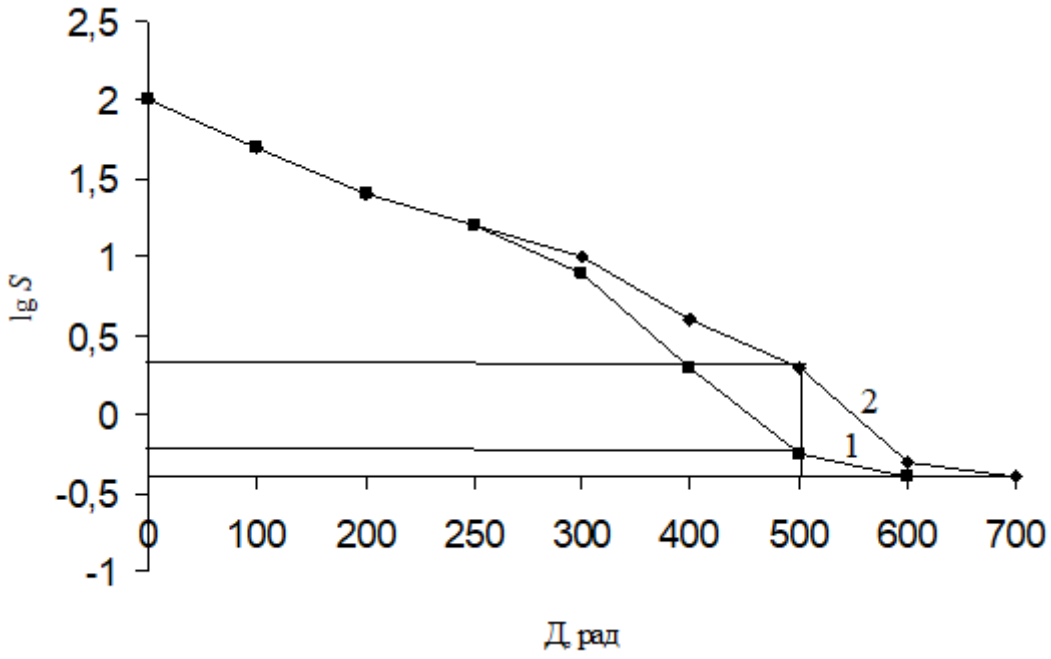
Розрахунок ЧЗД при S = 4% (lg$S$ = 0,6): графічно знаходимо $Д_1$ = 345 рад; $Д_2$ = 400 рад.



Звідси: $$ЧЗД = \frac{Д_2}{Д_1} = \frac{400}{345} = 1{,}16 > 1.$$

Спостерігається антагонізм дії.

Розрахунок ЧЗЛ при дозі 500 рад: графічно знаходимо $\lg S_1 = -0{,}24$; $\lg S_2 = 0{,}40$.



Звідси: $ЧЗЛ = 2{,}3(\lg S_1 - \lg S_2) = 2{,}3\cdot(-0{,}24 - 0{,}4) = -1{,}47 < 0$.

Підтверджується антагонізм дії.

Дану хімічну речовину не можна рекомендувати як протектор, оскільки значення ЧЗД низьке (для радіопротекторів ЧЗД повинен дорівнювати 2–3). Речовина неефективна в плані радіаційного захисту. Крім цього, в області доз до 250 рад протекторна дія взагалі не спостерігається.

Відповідь: адитивність змінюється антагонізмом дії з підвищенням дози радіації. ЧЗД = 1,16; ЧЗЛ = –1,47.

Завдання для самоконтролю

1. Оцініть характер комбінованої дії радіації і шуму за наступними експериментальними даними.

Д, рад	0	100	200	300	400	500	600
Виживання в контролі (S_1), %	100	52	28	14	5,6	2,5	1,0
Виживання при дії радіації і шуму (S_2), %	100	25	6,3	1,25	–	–	–

Визначить величину ЧЗД при 15% виживання і ЧЗЛ при дозі 200 рад.

Відповідь: синергізм комбінованої дії. ЧЗД = 0,48; ЧЗЛ = 1,47.

2. Визначить величину ЧЗД при 25% виживання і ЧЗЛ при дозі 600 рад за наступними експериментальними даними. Оцініть характер комбінованої дії.

Д, рад	0	100	200	300	400	500	600	700	800
Виживання у контролі (S_1), %	100	23	9	6	5	4	3,1	2,3	1,2
Виживання при дії радіації і хімічного агента (S_2), %	100	63	26	11,5	5	2,4	1,3	1,1	1

Відповідь: антагоносинергізм. ЧЗД = 2,33; ЧЗЛ = 0,83.

РОЗДІЛ 6. ДОЗОВІ МЕЖІ ОПРОМІНЕННЯ. ДОПУСТИМІІ КОНТРОЛЬНІ РІВНІ ЯК ОСНОВА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Теоретична частина

6.1. Основні регламентовані величини

У основу НРБУ покладені рекомендації МКРЗ, видані в 1989–96 рр. Рекомендації НРБУ ґрунтуються на наступних положеннях:

– концепції ефективної дози;

– новій системі допустимих рівнів з використанням вікозалежних дозиметричних моделей;

– двох груп опромінених осіб: персонал і населення;

– системі чотирьох груп радіаційно-гігієнічних регламентів:

- регламенти по обмеженню опромінення при практичній діяльності;
- регламентація аварійного опромінення населення;
- регламентація опромінення від техногенно-посилених джерел природного походження;
- обмеження медичного опромінення.

Радіаційна безпека і протирадіаційний захист по відношенню до практичної діяльності грунтуються на наступних принципах:

– будь-яка практична діяльність не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі опромінюваним особам в порівнянні з шкодою, яку вона заподіює (принцип виправданості);

– рівні опромінення від всіх видів практичної діяльності і іонізуючих випромінювань не повинні перевищувати встановлені межі доз (принцип неперевищення);

– рівні опромінення індивідуумів і/або кількість опромінених осіб повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних і соціальних чинників (принцип оптимізації).

НРБУ-97 включають 4 групи радіаційно-гігієнічних регламентованих величин.

1 група – регламенти контролю за практичною діяльністю, метою яких є підтримка опромінення персоналу і населення на прийнятному для індивідуума і суспільства рівні.

До цієї групи входять:

– межі доз;

– похідні рівні:
- допустимі рівні;
- контрольні рівні.

2 група – регламенти, метою яких є обмеження опромінення людини від медичних джерел.

До цієї групи входять:

– рівні, що рекомендуються.

3 група – регламенти, що визначають величину дози опромінення населення, що запобігає унаслідок втручання, в умовах радіаційної аварії.

До цієї групи входять:

– рівні втручання;

– рівні дії.

4 група – регламенти, що визначають величину дози опромінення населення, що запобігає унаслідок втручання, від техногенно-посилених джерел природного походження.

До цієї групи входять:

– рівні обов'язкових дій;

– рівні дії.

НРБУ встановлюються 3 категорії опромінених осіб:

Категорія А (персонал) – особи, які постійно або тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючих випромінювань;

Категорія Б (персонал) – особи, які безпосередньо не зайняті роботою з джерелами іонізуючого випромінювання, але у зв'язку з розташуванням робочих місць на об'єктах з радіаційно-ядерними технологіями можуть отримувати додаткове опромінення;

Категорія В – все населення.

6.2. Межі доз і допустимі рівні

Для категорії А і Б межі доз встановлюються в термінах індивідуальної річної ефективної дози зовнішнього і внутрішнього опромінення (межа річної ефективної дози) і еквівалентних доз зовнішнього опромінення (межа еквівалентної дози зовнішнього опромінення). Для категорії В обмеження опромінення здійснюється введенням меж річних ефективних і еквівалентних доз в критичній групі осіб категорії В. Останнє означає, що значення річної дози опромінення осіб, що входять до критичної групи, не повинно перевищувати межі дози, встановленої для категорії В.

З межею дози порівнюється сума ефективних доз опромінення від усіх індустріальних джерел випромінювання. У цю суму не включають:

– дозу, що отримують при медичному обстеженні або лікуванні;

– дозу опромінення від природних джерел випромінювання;

– дозу при аварійному опроміненні населення;

– дозу опромінення від техногенно-посилених джерел природного походження.

Додатково до межі річної ефективної дози встановлюються межі річної еквівалентної дози зовнішнього опромінення окремих органів і тканин (табл. 1):

– кришталика ока;

– шкіри;

– кистей і стоп.

6.3. Допустимі рівні

Для різних категорій встановлені допустимі рівні (ДР), що відрізняються за величиною.

Для категорії А і Б:

– допустиме надходження ($ALI_{А,Б}^{inhal}$) радіонуклідів через органи дихання;

– допустима концентрація ($PC_{А,Б}^{inhal}$) радіонуклідів у повітрі робочої зони;

Таблиця 1

Межі доз опромінювання, мЗв·рік$^{-1}$

Межі доз	Категорія опромінених осіб		
	А	Б	В
Д L_E (межа ефективної дози)	20	2	1
Межі еквівалентної дози зовнішнього опромінення Д L lens (для кришталика ока)	150	15	15
Д L skin (для шкіри)	500	50	50
Д L extrim (для кистей і стоп)	500	50	–

– допустима щільність потоку частинок ($PFP_{А,Б}$);

– допустима потужність дози зовнішнього опромінювання ($PDR_{А,Б}$);

– допустиме радіоактивне забруднення ($ДЗ_{А,Б}$) шкіри, спецодягу і робочих поверхонь.

Для категорії В:

– допустиме надходження радіонуклідів через органи дихання ($ALI_{В}^{inhal}$) і травлення (ALI^{ingest});

– допустимі концентрації радіонуклідів в повітрі ($PC_{В}^{inhal}$) та питній воді (PC^{ingest});

–допустиме скидання (ДС) і викид (ДВ) радіоактивних речовин в навколишнє середовище.

Допустимі рівні *ALI*, *PC*, розраховані для одного радіонукліда і одного шляху надходження за референтних умов опромінення приведені в таблицях НРБУ-97 («Референтні умови опромінення – сукупність параметрів, величин і умов, що характеризують опромінення людини»). Ці значення є радіаційно-гігієнічними регламентами.

Кожну з даних величин можна розрахувати. При цьому використовуються наступні параметри (референтні параметри):

– *референтний вік* (РВ) – один з шести фіксованих віків, вживаний в системі нормування опромінювання (таблиця 2);

– *референтний тип системного надходження* – один із стандартних типів фізико-хімічних станів речовин, класифікованих відповідно до їх швидкості проникнення з дихальної системи в рідині тіла. Розрізняють:

Тип *V* (Very fast) – речовини, що відклалися в дихальній системі, практично миттєво переходять в рідині тіла;

Таблиця 2

Референтний вік

Референтний вік	Початковий вік	Кінцевий вік
3 місяці	100 днів	12 місяців
1 рік	1 рік	2 року
5 років	2 року	7 років
10 років	7 років	12 років
15 років	12 років	17 років
«Дорослий»	старше 17 років	

Тип *F* (Fast) – речовини, що відклалися, швидко переходять в рідині тіла;

Тип *M* (Moderate) – речовини, що відклалися, мають проміжну швидкість переходу в рідині тіла;

Тип *S* (Slow) – речовини, що відклалися, погано розчинні і поволі переходять в рідині тіла.

– *референтний клас відкладення газів і пари* – клас газів або пари, класифікованих відповідно до їх розчинності і реактивності. Існують:

Клас SR-0 – нерозчинні і нереактивні. Відкладення в дихальній системі дуже низьке;

Клас SR-1 – розчинні і реактивні. Повне або часткове відкладення в дихальній системі з подальшим пролонгованим перенесенням в рідині тіла;

Клас SR-2 – у високому ступеню розчинні і реактивні. Повне відкладення в дихальній системі з практично миттєвим перенесенням в рідині тіла.

При розрахунках приймається, що щільність частинок аерозолю 3 г/см^3.

Медіанний за активністю аеродинамічний діаметр (АМАД) – це характеристика, що враховує полідисперсність аерозолю, інерційне і гравітаційне відкладення в органах дихання.

Величини допустимих надходжень через органи дихання ALI^{inhal} *розраховуються за формулою:*

$$ALI^{inhal}_{\text{А,Б}} = \min\left(\frac{ДL_E}{e_{k,d}}\right),$$

де: $ДL_E$ – межа ефективної дози категорій А і Б;

$e_{k,d}$ – доза на одиницю інгаляційного надходження, розрахована для референтного віку «Дорослий», референтного типу (класу) k медіанного за активністю аеродинамічного діаметру (АМАД) d.

Для категорії В населення ALI^{inhal} розраховується так само, але в знаменнику присутня величина $e_{k,d,\tau}$ – доза на одиницю інгаляційного надходження, розрахована для референтного типу (класу) k, АМАД d і референтного віку τ.

$$ALI^{inhal}_{\text{В}} = \min\left(\frac{ДL_E}{e_{k,d,\tau}}\right)$$

Величини допустимих концентрацій в повітрі $PC_{А,Б,В}^{inhal}$ *розраховуються за формулами:*

– для категорій А, Б

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{ДL_E}{g_{k,d}}\right),$$

де: $ДL_E$ – межа ефективної дози категорій А або Б;

$g_{k,\,d}$ – доза на одиницю концентрації в повітрі, розрахована для референтного віку «Дорослий», референтного типу (класу) k і АМАД d;

– для категорії В

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{ДL_E}{g_{k,d,\tau}}\right),$$

де: $g_{k,\,d,\,\tau}$ – доза на одиницю концентрації в повітрі, розрахована для референтного типу (класу) k , АМАД d і референтного віку τ.

Величини допустимих надходжень через органи травлення ALI_B^{ingest} *розраховуються за формулою:*

$$ALI_{\text{В}}^{ingest} = \min\left(\frac{ДL_E}{e_\tau}\right),$$

де: e_τ – доза на одиницю перорального надходження, розрахована для референтного віку τ.

Величини допустимих концентрацій в питній воді PC_B^{ingest} *розраховуються за формулою:*

$$PC_{\text{В}}^{ingest} = \min\left(\frac{ДL_E}{g_\tau}\right),$$

де: g_τ – доза на одиницю концентрації в питній воді, розрахована для референтного віку τ.

Значення e і g для всіх допустимих рівнів і категорій розраховуються з урахуванням референтних параметрів за допомогою референтних процедур розрахунку, затверджених Міністерством охорони здоров'я України. Значення g_τ можуть бути визначені за графіками «Доза на одиницю концентрації у повітрі при інгаляції залежно від AMAD і віку» Додатку.

При контролі величини річного надходження радіонуклідів і дози зовнішнього опромінення межа дози не буде перевищена, якщо одночасно виконуються нерівності:

$$\frac{E}{ДL_E} + \sum_i \frac{I_i^{inhal}}{ALI_i^{inhal}} + \sum_i \frac{I_i^{ingest}}{ALI_i^{ingest}} \le 1;$$

$$H_{lens} / ДL_{lens} \cdot 1;$$

$$H_{skin} / ДL_{skin} \cdot 1;$$

$$H_{extrim} / ДL_{extrim} \cdot 1,$$

де: E – ефективна доза зовнішнього опромінення;

$ДL_E$ – межа ефективної дози для певної категорії;

$I_i^{inhal,\ ingest}$ – річне інгаляційне або пероральне надходження i-го радіонукліда;

$ALI_i^{inhal,\ ingest}$ – допустиме надходження через органи дихання або травлення для i-го радіонукліда і певної категорії;

$H_{lens,\ skin,\ extrim}$ – річна еквівалентна доза зовнішнього опромінення кришталика ока, шкіри, кистей і стоп;

$ДL_{lens,\ skin,\ extrim}$ – межа еквівалентної дози зовнішнього опромінення кришталика ока, шкіри, кистей і стоп.

При контролі величини середньорічної об'ємної концентрації радіонуклідів в повітрі і питній воді, а також продуктах харчування межа дози не буде перевищена, якщо виконується нерівність:

$$\frac{E}{ДL_E} + \sum_i \frac{C_i^{inhal}}{PC_i^{inhal}} + \sum_i \frac{C_i^{ingest}}{PC_i^{ingest}} \le 1;$$

де: $C_i^{\ inhal,\ ingest}$ – середньорічні об'ємні концентрації i-го радіонукліда в повітрі і у воді;

$PC_i^{inhal,\ ingest}$ – допустима концентрація i-го радіонукліда в повітрі і в питній воді.

6.4. Допустимі рівні внутрішнього опромінення. Розрахунок гранично допустимого річного надходження радіонуклідів

Граничне допустиме річне надходження (ГДН) – це таке надходження радіоактивних речовин в організм протягом року, яке за 50 років створює в критичному органі еквівалентну дозу, рівну одній *гранично допустимій дозі* (ГДД). *ГДД* – це найбільше значення

індивідуальної еквівалентної дози за рік, яке при рівномірній дії протягом 50 років не викличе в стані здоров'я персоналу несприятливих змін. ГДН розраховується для категорії А.

Для категорії Б розраховують *границю річного надходження* (ГРН) – це таке надходження радіоактивних речовин в організм протягом року, яке за 70 років створює в критичному органі еквівалентну дозу, рівну одній *границі дози* (ГД). *ГД* – це гранична еквівалентна доза за рік.

Для більшості ізотопів ГДН розраховують на підставі допущення, що виведення радіоактивних речовин із критичних органів відбувається за експоненціальним законом:

$$\text{ГДН} = \frac{\text{ДВ}}{T_{\text{еф}} \cdot f_2 \left(1 - e^{\frac{-0,693 \cdot t}{T_{\text{еф}}}}\right)},$$

де: ДВ – це допустимий вміст радіонукліда, Бк;

$T_{\text{еф}}$ – ефективний період напіввиведення, доб.;

t – час, доба;

ГДН вимірюється в мкКі/рік.

Зазвичай в критичних органах рівновага між процесами накопичення і виведення радіонуклідів наступає достатньо швидко ($T_{\text{еф.}}$ має малу величину), тому множник ($1–e^{-0,693t/T\text{еф}}$) перетворюється на одиницю. Звідси, розрахунок ГДН можна проводити за скороченою формулою:

$$\text{ГДН} = \frac{\text{ДВ}}{T_{\text{еф}} \cdot f_2}.$$

Виключенням є лише 20 ізотопів, у яких протягом 50 років рівноваги не наступає. Це ^{90}Sr, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{239}Pu та ін.

6.5. Розрахунок допустимої концентрації радіонуклідів

Допустима концентрація (ДК) – це відношення ГДН радіоактивної речовини до об'єму води або повітря, з якими воно поступає в організм людини протягом року. Річний об'єм споживаної

води 800 л, повітря: для категорії А – $2{,}5 \cdot 10^6$ л, для категорії Б – $7{,}3 \cdot 10^6$ л.

$ДК_А$ радіонуклідів при їх постійному рівні вмісту в повітрі знаходять за формулою:

$$ДК_А = \frac{ГДН}{2{,}5 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Кі/л},$$

де: f_1 – коефіцієнт затримки радіоактивної речовини у легенях;

$2{,}5 \cdot 10^6$ – об'єм легеневої вентиляції у профробітників, л/рік;

10^6 – коефіцієнт перекладу активності мкКі в Кі.

$$ДК_Б = \frac{ГДН}{7{,}3 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1}, \text{ Кі/л},$$

де: $7{,}3 \cdot 10^6$ – об'єм легеневої вентиляції у осіб категорії Б.

ДК деяких радіонуклідів представлені в таблиці 3. ДК у воді завжди більше, ніж в повітрі.

6.6. Розрахунок допустимого вмісту радіонукліда в організмі

Допустимий вміст (ДВ) речовин в організмі – це така їх кількість, при якій створюється доза на критичний орган, що не перевищує ГДД. ДВ залежить від ступеня небезпеки радіоактивних елементів при попаданні їх всередину і визначається їх радіотоксичністю.

ДВ знаходять на підставі оцінки *допустимої поглиненої енергії* (ДПЕ) в критичному органі, яка відповідає ГДД.

ДПЕ розраховують за рівнянням:

$$ДПЕ = \frac{ГДД \cdot 100 \cdot m}{Q \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot t}, \text{ МеВ/с·орган},$$

де: m – маса критичного органу, г;

t – робочий час за рік в с;

Q – коефіцієнт розподілу для внутрішнього опромінення, рівний для α та β–випромінювання – 5, γ–випромінювання – 1;

100 – поглинена енергія, відповідна одиниці рад в ерг/г;

$1{,}6 \cdot 10^{-6}$ – енергія, відповідна 1МеВ в ерг.

Таблиця 3

Допустимі концентрації радіонуклідів у воді та повітрі

Радіонуклід	ДК, Бк/л		Група радіотоксичності
	Вода	Повітря робочих приміщень	
Тритій	$11{,}1\cdot10^{3}$	$2\cdot10^{2}$	4
Карбон-14	$3{,}7\cdot10^{3}$	$1{,}5\cdot10^{2}$	4
Натрій-24	$3\cdot10^{2}$	3,7	3
Фосфор-32	$2\cdot10^{2}$	2,6	3
Кобальт-60	$3{,}7\cdot10^{2}$	0,33	3
Селен-75	$3\cdot10^{3}$	3,7	3
Бром-82	$3{,}7\cdot10^{2}$	7,4	3
Стронцій-90	11,1	0,11	2
Аргентум-110	$3{,}3\cdot10^{2}$	0,37	2
Телур-127	$7{,}4\cdot10^{2}$	1,5	3
Йод-131	22,2	0,33	3
Цезій-137	37	0,37	3
Барій -140	$2{,}6\cdot10^{2}$	1,5	3
Талій-204	$7{,}4\cdot10^{2}$	1,11	3
Плюмбум-210	0,4	$3{,}7\cdot10^{-3}$	1
Полоній-210	7,4	$7{,}4\cdot10^{-3}$	1
Радій-226	0,15	$11{,}1\cdot10^{-4}$	1
Уран-238	7,4	$25{,}9\cdot10^{-4}$	2
Плутоній-239	37	$14{,}8\cdot10^{-4}$	1

Тоді розрахунок ДС проводять за рівнянням:

$$\text{ДВ} = \frac{\text{ДПЕ}}{E_{\text{еф}} \cdot 3{,}7 \cdot 10^{4}},\ \text{мкКі/орган},$$

де: $E_{\text{еф.}}$ – ефективна енергія, МеВ/розпад;
$3{,}7\cdot10^{4}$ – активність 1мкКі в розпад/с.
Для остеотропних елементів ДВ визначається за формулою:

$$\text{ДВ}_X = \frac{\left(\text{ДВ}\cdot f_2 \cdot E_{\text{еф}}\right)_{\text{Ra}}}{\left(f_2 \cdot E_{\text{еф}}\right)_X},$$

де: ДС_{Ra} рівне 0,1 мкКі;
$f_{2\text{Ra}}$ = 0,99;
X – остеотропний ізотоп.

6.7. Розрахунок допустимих рівнів внутрішнього опромінення для суміші радіонуклідів

Якщо відомий склад суміші радіонуклідів, то ДВ, ДК, ГДН можна розрахувати за формулою:

$$\text{ГДН}_{\text{суміші}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ГДН}_i}},$$

де: ГДН_i – ГДН окремого i – го радіонукліда;
n_i – його відносний вміст в суміші в %.

6.8. Розрахунок ДК і потужності дози радіонуклідів благородних газів

Радіаційні дії від присутності в повітрі радіонуклідів благородних газів (РБГ): аргону, криптону, ксенону, а також короткоживучих радіонуклідів С, N і О визначається не внутрішнім опроміненням, а зовнішнім β і γ–випромінюванням з об'єму повітря приміщення.

ДК суміші РБГ розраховують за формулою:

$$\text{ДК}_{\text{суміші}} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ДК}_i}},$$

де: n_i – відносний вміст радіонукліда в суміші %;
ДК_i – допустима концентрація i -го радіонукліда.

Для набуття точного значення $\text{ДК}_{\text{суміші}}$ розраховують окремо три значення ДК для кожного з критичних органів (шкіри, підшкірних тканин і гонад), дійсним значенням $\text{ДК}_{\text{суміші}}$ вважають найменше.

Потужність дози (P), створювана РБГ в критичних органах за рахунок зовнішнього γ і β–випромінювання з повітря приміщень різного об'єму і на відкритій місцевості, може бути розрахована за формулою:

$$P = P_\beta + P_\gamma = \Sigma P_{\beta i} \cdot n_i \cdot C_i + \Sigma P_{\gamma i} \cdot n_i \cdot C_i, \text{ рад/с},$$

де: n_i – відносний вміст в суміші і – го радіонукліда;

C_i – його концентрація;

$P_{\beta i}$ та $P_{\gamma i}$ – потужність дози β і γ–випромінювання, створювана *i*-им радіонуклідом при його концентрації 1 Кі/л, рад·л/с·Кі.

6.9. Поглинена тканинна доза

Виходячи з енергії джерела іонізуючого випромінювання (радіонукліда), його активності і ряду інших параметрів, можна розрахувати потужність дози β–випромінювання і поглинені тканинні дози β і γ–випромінювань.

Щоб розрахувати потужність дози, створювану β-випромінювачем в тканині, необхідно знати концентрацію активності в тканини і енергію частинок. У разі β-випромінювачів при розрахунку тканинних доз використовується середня енергія частинок, рівна 1/3 максимальній енергії.

Потужність дози визначається як енергія, поглинена в 1 г тканині в одиницю часу. Одиниця $Д_{погл.}$ – 1 рад.

Потужність дози β–випромінювання дорівнює:

$$P_\beta = 3{,}7\cdot10^4\cdot C\cdot1{,}6\cdot10^{-6}\cdot\bar{E}\cdot10^{-2} = 5{,}92\cdot10^{-4}\cdot E\cdot C,\ \text{рад/с},$$

де: $3{,}7\cdot10^4$ – число розпадів в секунду на 1 мкКі;

C – концентрація активності, мкКі/г;

$\bar{E}$ – середня енергія β-частинок на розпад, МеВ;

1 МеВ = $1{,}6\cdot10^{-6}$ ерг;

10^{-2} рад = 1 ерг/г.

Якщо [C] = мКі, те рівняння приймає вигляд:

$$P_\beta = 0{,}592\cdot\bar{E}\cdot C\ .$$

Доза визначається за рівнянням:

$$Д_\beta = \int_0^t P_\beta\cdot dt.$$

Якщо початкова активність ізотопу, що потрапив в організм C_0, то після часу t:

$$C = C_0\cdot e^{-\lambda_{еф}\,t} = C_0\cdot e^{\frac{-0{,}693\cdot t}{T_{еф}}},\ \text{мКі/г}.$$

Тоді:

$$Д_{\beta} = 0{,}592 \cdot \overline{E} \cdot C = 0{,}592 \cdot \overline{E} \cdot \int_0^t C_0 \cdot e^{\frac{-0{,}693 \cdot t}{T_{еф}}} \cdot dt =$$

$$= 0{,}592 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \frac{T_{еф}}{0{,}693} \left(1 - e^{\frac{-0{,}693 \cdot t}{T_{еф}}} \right) =$$

$$= 0{,}854 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \cdot T_{еф} \cdot \left(1 - e^{\frac{-0{,}693 \cdot t}{T_{еф}}} \right).$$

$[T_{еф}]$ = с.

Якщо $[T_{еф}]$ = доба, то:

$$Д_{\beta} = 7{,}39 \cdot 10^4 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \cdot T_{еф} \cdot \left(1 - e^{\frac{-0{,}693 \cdot t}{T_{еф}}} \right).$$

Якщо *t* завелике, то:

$$Д_{\beta} = 7{,}39 \cdot 10^4 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \cdot T_{еф}, \text{ рад.}$$

Доза, створювана β-випромінювачем у критичному органі після заковтування 1 мКі ізотопу, визначається співвідношенням:

$$Д_{\beta} = \frac{7{,}39 \cdot 10^4 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \cdot T_{еф} \cdot f}{m}, \text{ рад,}$$

де: *m* – маса органу, г;

f – частка ізотопу, що досягає критичного органу.

Поглинена тканинна доза від інкорпорованого γ-випромінювача розраховується за формулою:

$$Д_{\gamma} = \frac{\tau \cdot K_{\gamma} \cdot g \cdot 97}{100 \cdot m},$$

де: τ – середня тривалість життя, год.

$$\tau = \frac{T_{\text{еф}}}{0{,}693} = \frac{1}{\lambda_{\text{еф}}};$$

K_γ – гама стала;

m – маса, г;

100 – перехідний коефіцієнт для виразу поглиненої дози в рад (1 рад = 100 ерг);

97 – поглинена доза в ерг при поглинанні 1 Р в 1 г тканині;

g – геометричний чинник (для тулуба людини g = 200).

Введення поняття геометричного чинника викликане наступним. Унаслідок великої проникаючої здатності γ-квантів при розрахунку дози внутрішнього опромінення виникають певні математичні труднощі. Для спрощення розрахунків всі органи представляють у вигляді простих геометричних тіл: сфери, циліндра. Розраховані числові значення g для центрів сфери і циліндра залежно від їх радіусу і висоти циліндра при μ = 0,03 см$^{-1}$ (біологічна тканина) і для людського тіла. Середній геометричний чинник для всього сферичного об'єму: $\bar{g} = 3\pi \cdot R_{\text{сф}}$, якщо $R_{\text{сф}} < 10$ см.

Приклади вирішення завдань

1. Розрахуйте величину межі ефективної дози для категорії В при інгаляційному надходженні ^{90}Sr (референтний тип *S*) в організм дорослої людини у вигляді аерозолю з медіанним по активності аеродинамічним діаметром 0,1 мкм.

Дано:
^{90}Sr
АМАД=0,1 мкм
тип *S*
$PC^{inhal} = 2 \cdot 10^{-1}$ Бк/м^3
(Табл. 1 Додатку)
референтний вік
«Дорослий»

Знайти: DL_E

Рішення:

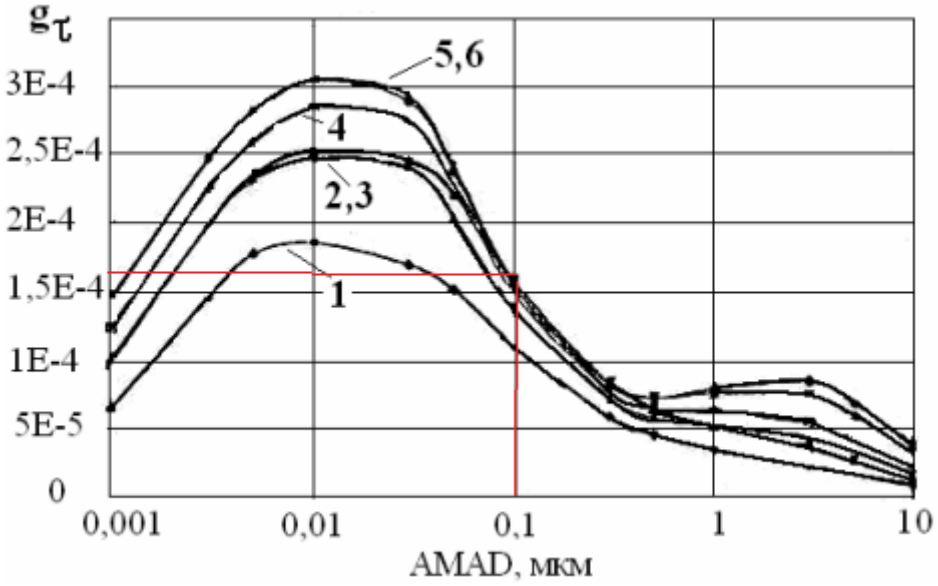
Для категорії В (населення) величини допустимих концентрацій в повітрі PC^{inhal} розраховуються за формулою:

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{ДL_E}{g_\tau}\right).$$

Значення PC^{inhal} взято з таблиці 1 Додатку і введено в «Дано».

Звідси: $DL_E = PC^{inhal} \cdot g_\tau$.

Величина дози на одиницю концентрації в повітрі, розрахована для референтного типу *S*, АМАД = 0,1 мкм і референтного віку «Дорослий», визначається за рис. 3 Додатку. g_τ рівний $1{,}6\cdot10^{-4}$ Зв·м^3/рік·Бк.



Тоді: $DL_E = 0{,}2\cdot1{,}6\cdot10^{-4} = 3{,}2\cdot10^{-5}$ Зв/рік.

Відповідь: $3{,}2\cdot10^{-5}$ Зв/рік.

2. Визначить уточнене значення допустимої концентрації ^{137}Cs в повітрі у вигляді аерозолю з медіанним по активності аеродинамічним діаметром 5 мкм референтного типу *F* при його надходженні в організм людини віком до 15 років. Гранична ефективна доза складає $4{,}5\cdot10^{-6}$ Зв/рік.

Дано:
^{137}Cs
АМАД = 5 мкм
тип *F*
DL_E = 4,5.10-6 Зв/рік
Референтний вік «15 років»

Знайти : PC^{inhal}

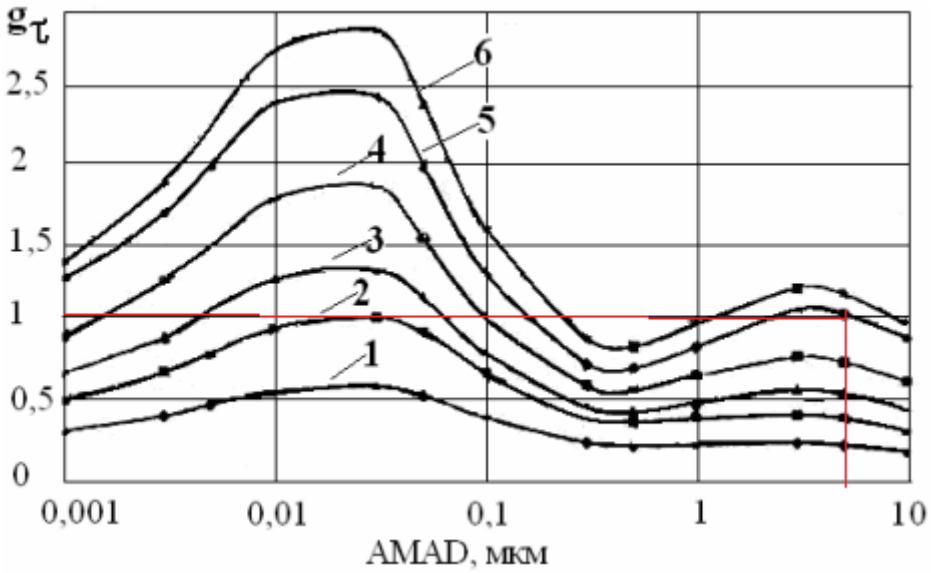
Рішення: Величину PC^{inhal} розраховуємо за рівнянням:

$$PC^{inhal} = \min\left(\frac{ДL_E}{g_\tau}\right)$$

Значення g_τ визначаємо за рис. 4 Застосування для аерозолю референтного типу *F*, віку 15 років і АМАД = 5 мкм. Вісь *OX* (АМАД) всіх рисунків Додатку є логарифмічною, щоб знайти величину

АМАД = 5 мкм, треба визначити логарифм АМАД: lg5 = 0,7.

Знаходимо значення lgАМАД = 0,7 між 0 (lg1) і 1 (lg10). Від цієї точки встановлюємо перпендикуляр до перетину з кривою (вік 15 років) і опускаємо перпендикуляр на вісь OY (g_τ). Значення g_τ рівне 1,0 Зв·м^3/рік·Бк.

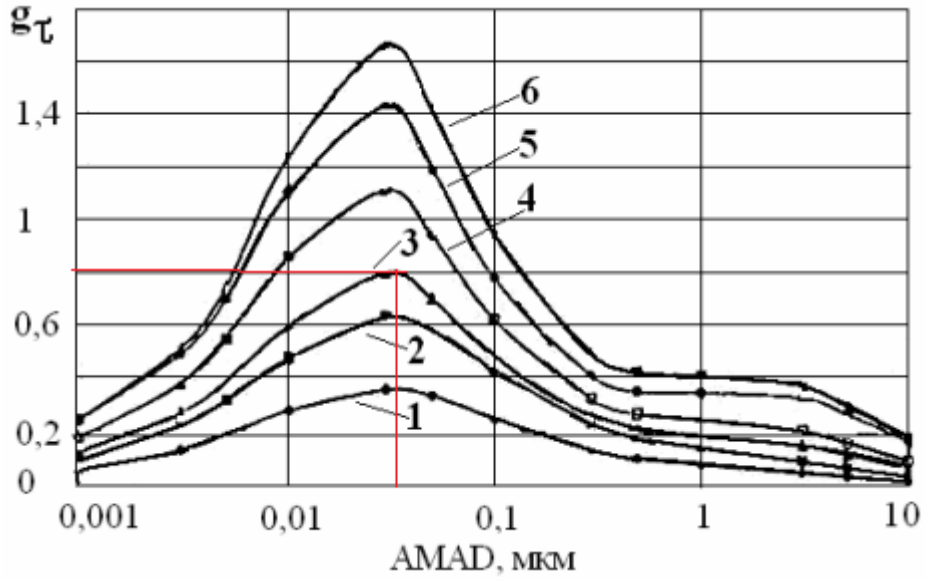


Звідси: $$PC^{inhal} = \frac{4{,}5\cdot10^{-6}}{1} = 4{,}5\cdot10^{-6}\ \text{Бк/м}^3.$$

Відповідь: 4,5·10^{-6} Бк/м^3.

3. Визначить медіанний за активністю аеродинамічний діаметр аерозолю ^{239}Pu референтного типу M при його надходженні в організм п'ятирічної дитини. Величина граничної ефективної дози складає 3,2·10^{-4} Зв/рік.

Дано:	Рішення:
^{239}Pu DL_E = 3,2·10^{-4} Зв/рік PC^{imhal} = 4·10^{-4} Бк/м^3 (табл. 1 Додатки) референтний вік «5 років»	Визначимо величину дози на одиницю концентрації в повітрі: $$g_\tau = \frac{DL_E}{PC^{inhal}} = \frac{3{,}2\cdot10^{-4}}{4\cdot10^{-4}} = 0{,}8\ \text{Зв·м}^3\text{/рік·Бк}.$$ Використовуючи рис. 8 Додатку, визначимо АМАД аерозолю ^{239}Pu (тип M) при його надходженні в організм дитини віком «5 років». По графічній залежності g_τ – lg АМАД набуваємо значення lg АМАД = –1,5.
Знайти: АМАД	



Тоді АМАД = $10^{-1,5}$= 0,03 мкм.

Відповідь: 0,03 мкм.

4. Розрахуйте граничне допустиме річне надходження (ГДН) ^{235}U в нирки людини.

Дано:	Рішення:
^{235}U орган – нирки людини $ДВ_A$ = 37 Бк $T_{еф}$ = 15 діб f_2 = 0,065	Розрахунок ГДН проводиться за формулою: $$ГДН = \frac{ДВ}{T_{еф} \cdot f_2\left(1 - e^{\frac{-0,693 \cdot t}{T_{еф}}}\right)}.$$
Знайти: ГДН	Проте $T_{еф}$ виведення ^{235}U з нирок людини малий (15 діб), тому формула перетвориться до: $$ГДН = \frac{ДВ}{T_{еф} \cdot f_2}.$$

Значення ДВ, f_2 і $T_{еф}$ взяті з таблиці 2 Додатку «Біологічні і фізичні константи деяких радіонуклідів» і введені в «Дано».

Розрахунок ГДН:

$$ГДН = \frac{37}{15 \cdot 0,065} = 37,95 \text{ Бк/добу}.$$

Загальноприйнятою одиницею вимірювання ГДН є мкКі·рік$^{-1}$, перерахуємо ГДН в дану одиницю:

$$\text{ГДН} = \frac{37{,}95 \cdot 365 \cdot 10^6}{3{,}7 \cdot 10^{10}} = 0{,}37 \text{ мкКі/рік.}$$

Відповідь: 0,37 МкКі/рік.

5. Визначить гранично допустиме річне надходження ^{131}I в критичний орган.

Дано: ^{131}I Щитовидна залоза $ДВ_A = 2{,}59 \cdot 10^3$ Бк $T_{еф} = 7{,}6$ діб $f_2 = 0{,}2$ (табл. 2 Додатку)	Рішення: Критичним органом для ^{131}I в організмі людини є щитовидна залоза, що визначається за максимальною величиною частки нукліда, що потрапляє в даний орган f_2 (табл. 2 Додатку). У подібних випадках виключають значення $f_2 = 1$ для всього тіла, так як для всього організму f_2 органів підсумовуються.
Знайти: ГДН	

Розрахунок ГДН проводять за спрощеною формулою, оскільки значення $T_{еф}$ замале:

$$\text{ГДН} = \frac{ДВ}{T_{еф} \cdot f_2} = \frac{2{,}59 \cdot 10^3}{0{,}2 \cdot 7{,}6} = 1703{,}95 \text{ Бк/доб.}$$

Проведемо перерахунок ГДН в одиниці вимірювання мкКі/рік:

$$\text{ГДН} = \frac{1703{,}95 \cdot 365 \cdot 10^6}{3{,}7 \cdot 10^{10}} = 16{,}8 \text{ мкКі/рік.}$$

Відповідь: 16,8 мкКі/рік.

6. Розрахуйте гранично допустиме річне надходження (ГДН) радіонуклідів ^{60}Co і ^{95}Zr в тіло людини при їх активностях 1,8% і 16,5% відповідно.

Дано: все тіло $ДВ_{A\ Co} = 4{,}81 \cdot 10^3$ Бк $ДВ_{A\ Zr} = 6{,}66 \cdot 10^3$ Бк $T_{еф\ Co} = 9{,}5$ діб $T_{еф\ Zr} = 55{,}5$ діб (табл. 2 Додатку)	Рішення: $\text{ГДН}_{\text{суміші}}$ радіонуклідів розраховується за формулою:

$f_{2\,Co} = f_{2\,Zr} = 1$ $n_{Co} = 1{,}8\%$ $n_{Zr} = 16{,}5\%$ Знайти: $ГДН_{суміші}$	$$ГДН_{суміші} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{ГДН_i}} = \frac{100}{\frac{n_{Co}}{ГДН_{Co}} + \frac{n_{Zr}}{ГДН_{Zr}}}.$$ Для розрахунку $ГДН_{суміші}$ спочатку необхідно розрахувати ГДН окремих радіонуклідів.

$$ГДН_{Co} = \frac{4{,}81 \cdot 10^3}{9{,}5 \cdot 1} = 506{,}32 \text{ Бк/доб};$$

$$ГДН_{Zr} = \frac{6{,}66 \cdot 10^3}{55{,}5 \cdot 1} = 120 \text{ Бк/доб.}$$

Звідси $$ГДН_{суміші} = \frac{100}{\frac{1{,}8}{506{,}32} + \frac{16{,}5}{120}} = 709{,}22 \text{ Бк/доб} =$$

$$= \frac{709{,}22 \cdot 365}{3{,}7 \cdot 10^4} = 6{,}99 \text{ мкКі/рік.}$$

Відповідь: 6,99 мкКі/рік.

7. Розрахуйте допустиму концентрацію радіонукліда ^{90}Sr в критичному органі, якщо частка нукліда, що утримується легенями дорівнює 0,01.

Дано: ^{90}Sr $ДВ_А = 7{,}4 \cdot 10^4$ Бк $f_2 = 0{,}99$ $f_1 = 0{,}01$ $T_{еф} = 6{,}4 \cdot 10^3$ доб (табл. 2 Додатку) Знайти: $ДК_А$	Рішення: Розрахунок $ДК_А$ проводять за формулою: $$ДК_А = \frac{ГДН}{2{,}5 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \cdot f_1},$$ тому спочатку розрахуємо ГДН для критичного органу – кісткової тканини: f_2 = 0,99 (табл. 2 Додатку)

$$\text{ГДН} = \frac{\text{ДВ}}{T_{\text{еф}} \cdot f_2} = \frac{7{,}4 \cdot 10^4}{0{,}99 \cdot 6{,}4 \cdot 10^3} = 11{,}68 \text{ Бк/доб} = 0{,}12 \text{ мкКі/рік.}$$

$$\text{Звідси: } \text{ДК}_\text{А} = \frac{0{,}12}{2{,}5 \cdot 10^{12} \cdot 0{,}01} = 0{,}048 \cdot 10^{-10} = 4{,}8 \cdot 10^{-12} \text{ Кі/л.}$$

Відповідь: $4{,}8 \cdot 10^{-12}$ Кі/л.

8. У кістковій тканині людини відбулося накопичення радіонукліда ^{226}Ra з одночасним поглинанням 0,8 Дж енергії. Розрахуйте еквівалентну дозу для тканини.

Дано:
E = 0,8 Дж
$m_{\text{кістк тк}}$ = 5000 г
Q = 5

Знайти: $Д_{екв}$

Рішення: Для розрахунку $Д_{екв}$ необхідно знати $Д_{погл}$. Її розраховують за рівнянням:

$$Д_{\text{погл.}} = \frac{E}{m}$$

де: m – це маса органу, що поглинає випромінювання, в даному випадку – кісткової тканини, беремо з Табл. 3 Додатку «Маси органів умовної людини»: m = 5000 г = 5 кг;

E – енергія іонізуючого випромінювання.

Звідси:
$$Д_{\text{погл.}} = \frac{0{,}8}{5} = 0{,}16 \text{ Гр.}$$

Розрахунок $Д_{екв}$ проводять за формулою:

$$Д_{\text{екв.}} = Q \cdot Д_{\text{погл.}},$$

де: Q – коефіцієнт розподілу випромінювання (для внутрішнього опромінення), який для α- і β-випромінювань рівний 5, а γ-випромінювання – 1. Оскільки ^{226}Ra – α-випромінювач, то Q = 5. Звідси:

$$Д_{\text{екв.}} = 5 \cdot 0{,}16 = 0{,}8 \text{ Зв.}$$

Відповідь: 0,8 Зв.

9. Накопичення радіонукліда ^{210}Po в критичному органі привело до виділення сумарній енергії $6 \cdot 10^5$ ерг. Розрахуйте еквівалентну дозу для тканини даного органу.

Дано:

Рішення: Критичним органом для

$E = 6 \cdot 10^5$ ерг $m_{\text{нирки}} = 310$ г (табл. 3 Додатку) $Q = 5$ (α-випромінювач)	^{210}Po є нирки: $f_2 = 1{,}13$ (табл. 2 Додатку). Для розрахунку $Д_{екв}$ необхідно знати $Д_{погл}$. Поглинену дозу можна розрахувати в Гр і рад, залежно від
Знайти: $Д_{екв}$	

того в яких одиницях буде енергія випромінювання *E*. Якщо *E* беруть в Дж, то треба пам'ятати, що 1Дж = 10^7 ерг (система СГС), тоді:

$$Д_{погл.} = \frac{E}{m} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-7} (Дж)}{310 \cdot 10^{-3} (кг)} = 0{,}19 \text{ Гр.}$$

Звідси: $Д_{екв.} = Q \cdot Д_{погл.} = 5 \cdot 0{,}19 = 0{,}95$ Зв.

Якщо *E* беруть в ерг, то треба пам'ятати, що одиниця вимірювання $Д_{погл}$ рад відповідає поглинанню 100 ерг випромінювання одним грамом речовини. Тоді:

$$Д_{погл.} = \frac{6 \cdot 10^5}{310 \cdot 10^2} = 19 \text{ рад.}$$

Звідси: $Д_{екв.} = 5 \cdot 19 = 95$ бер.

Відповідь: 0,95 Зв або 95 бер.

10. Розрахуйте допустимий вміст радіонукліда ^{90}Sr з $E_{еф\ \beta} = 1{,}46$ МеВ/розпад і $ГДД_{кістк} = 3{,}45 \cdot 10^{-7}$ бер за умови тривалості роботи 10 год/тиждень.

Дано: ^{90}Sr $ГДД = 3{,}45 \cdot 10^{-7}$ бер $E_{еф} = 1{,}46$ МеВ/розпад $t = 10$ год/тиждень $Q = 5$ (β^--випромінювач) $m = 5000$ г (табл. 3 Додатку)	Рішення: Розрахунок допустимого вмісту ДВ проводять за формулою: $ДВ = \frac{ДПЕ}{E_{еф} \cdot 3{,}7 \cdot 10^4}$,
Знайти: ДВ	

де допустима поглинена енергія ДПЕ розраховується за співвідношенням:

$$\text{ДПЕ} = \frac{\text{ГДД} \cdot 100 \cdot m}{Q \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot t},$$

де: m – маса критичного органу або тканини. У нашому випадку це маса кісткової тканини 5000 г (табл. 3 Додатку), що ми визначили за значенням $f_2 = 0{,}99$ (табл. 2 Додатку);

t – робочий час за рік, виражений в секундах:

$$t = 10 \cdot 50 \cdot 3600 = 1{,}8 \cdot 10^6 \text{ с/рік.}$$

При розрахунку враховано, що в році 50 робочих тижнів, а в годині 3600 секунд. Звідси:

$$\text{ДПЕ} = \frac{100 \cdot 3{,}45 \cdot 10^{-7} \cdot 5000}{1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1{,}8 \cdot 10^6} = \frac{3{,}45 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{1{,}6 \cdot 5 \cdot 1{,}8} = 1{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ Мев/с·орган;}$$

$$\text{ДВ} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-2}}{3{,}7 \cdot 10^4 \cdot 1{,}46} = 2{,}22 \cdot 10^{-7} \text{ мкКі/орган.}$$

Відповідь: $2{,}22 \cdot 10^{-7}$ мкКі/орган.

11. Розрахуйте допустимий вміст β^-, γ-активного радіонукліда ^{131}I із значеннями ефективних енергій випромінювань: β^- – 0,61 МеВ/розпад; γ – 0,36 МеВ/розпад, за умови 4-годинного робочого дня з використанням даного радіонукліда. ГДД йоду-131 для критичного органу $1{,}38 \cdot 10^{-4}$ бер.

Дано: ^{131}I
ГДД = $1{,}38 \cdot 10^{-4}$ бер
$E_{\text{еф }\beta^-} = 0{,}61$ МеВ/розпад
$E_{\text{еф }\gamma} = 0{,}36$ МеВ/розпад
$t = 4$ год/добу
$Q = 5$ (β^--випромінювач)
$m_{\text{щитовидної залози}} = 20$ г (табл. 3 Додатку)

Знайти: ДВ

Рішення: Розрахуємо допустиму поглинену енергію ДПЕ за формулою:

$$\text{ДПЕ} = \frac{\text{ГДД} \cdot 100 \cdot m}{Q \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot t},$$

де: m – маса критичного органу, для ^{131}I маса щитовидної залози ($f_2 = 0{,}2$ – табл. 2 Додатку) рівна 20 г;

Q – коефіцієнт розподілу.

У разі змішаного випромінювання значення Q_i перемножуються:

$$Q = Q_\beta \cdot Q_\gamma = 5 \cdot 1 = 5;$$

t – робочий час в с за рік: $t = 4 \cdot 5 \cdot 50 \cdot 3600 = 3{,}6 \cdot 10^6$ с/рік.

Звідси:

$$\text{ДПЕ} = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 20}{1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 3{,}6 \cdot 10^6} = \frac{1{,}38 \cdot 2 \cdot 10^{-1}}{1{,}6 \cdot 5 \cdot 3{,}6} = 9{,}58 \cdot 10^{-3} \text{МеВ/с·орган.}$$

Розрахунок ДВ:

$$\text{ДВ} = \frac{\text{ДПЕ}}{E_{\text{еф}} \cdot 3{,}7 \cdot 10^4} = \frac{\text{ДПЕ}}{3{,}7 \cdot 10^4 \left(E_{\text{еф }\beta} + E_{\text{еф }\gamma}\right)} =$$

$$= \frac{9{,}58 \cdot 10^{-3}}{3{,}7 \cdot 10^4 (0{,}61 + 0{,}36)} = 2{,}67 \cdot 10^{-7} \text{ мкКі/орган}$$

Відповідь: $2{,}67 \cdot 10^{-7}$ мкКі/орган.

12. Розрахуйте допустиму концентрацію суміші радіонуклідів ^{135}Xe і ^{137}Xe, з яких перший дає 20% у загальну активність, для категорії А опромінених в приміщенні об'ємом 250 м^3.

Дано:
Категорія А
$V_{\text{прим.}} = 250$ м^3
$n_{\text{Xe-135}} = 20\%$
$n_{\text{Xe-137}} = 80\%$

Знайти: $\text{ДК}_{\text{суміші}}$

Рішення: Дійсне значення $\text{ДК}_{\text{суміші}}$ радіонуклідів дорівнює найменшому значенню з трьох розрахованих значень: для шкіри, підшкірних тканин і гонад. Значення ДК окремих радіонуклідів для вказаних тканин представлені в табл. 5 Додатку «Допустима концентрація ДК радіонуклідів РБГ, робочих приміщень, що містяться в повітрі, і на відкритій місцевості».

Розрахунок ДК проводять за формулою:

$$\text{ДК} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{\text{ДК}_i}},$$

$$ДК_{шкіри} = \frac{100}{\frac{20}{7,6\cdot10^{-8}} + \frac{80}{2,1\cdot10^{-8}}} = \frac{100}{2,63\cdot10^{8} + 38,1\cdot10^{8}} =$$

$$= \frac{100}{(2,63+38,1)\cdot10^{8}} = \frac{10^{-6}}{40,73} = 2,46\cdot10^{-8} \text{ Кі/л};$$

$$ДК_{підшкірн} = \frac{100}{\frac{20}{2,8\cdot10^{-7}} + \frac{80}{1,5\cdot10^{-8}}} = 1,85\cdot10^{-8} \text{ Кі/л};$$

$$ДК_{гонад} = \frac{100}{\frac{20}{6,8\cdot10^{-7}} + \frac{80}{8,7\cdot10^{-7}}} = 8,24\cdot10^{-7} \text{ Кі/л};$$

Найменшим значенням є $ДК_{підшкірних\ тканин}$, отже $ДК_{суміші} = 1,85\cdot10^{-8}$ Кі/л.

Відповідь: $1,85\cdot10^{-8}$ Кі/л.

13. Розрахуйте потужність дози β^-- і γ-випромінювань при опроміненні підшкірних тканин людини РБГ, що складається з 4% ^{88}Kr 12% ^{89}Kr при їх концентраціях, Кі/л: ^{88}Kr – 0,6; ^{89}Kr – 1,3; на відкритій місцевості.

Дано:	Рішення: Розрахунок потужності дози випромінювання від РБГ проводиться за формулою:
Відкрита місцевість $N_{Kr\text{-}88}$ = 4% (0,04) $N_{Kr\text{-}89}$ = 12% (0,12) $C_{Kr\text{-}88}$ = 0,6 Кі/л $C_{Kr\text{-}89}$ = 1,3 Кі/л	$$P = \sum_i P_i \cdot C_i \cdot N_i,$$
Знайти: P_β, P_γ	

де: C_i - концентрація i-го радіонукліда в суміші;

N_i – його частка в суміші;

P_i – потужність дози, створювана РБГ в окремих органах. Значення $P_{\beta i}$ і $P_{\gamma i}$ беруть з табл. 4 Додатку «Потужність дози, що створюється в критичних органах людини».

Звідси:

$$P_\beta = P_{\beta\ Kr\text{-}88}\cdot C_{Kr\text{-}88}\cdot N_{Kr\text{-}88} + P_{\beta\ Kr\text{-}89}\cdot C_{Kr\text{-}89}\cdot N_{Kr\text{-}89} =$$

$$= 38 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}04 + 158 \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}12 = 0{,}912 + 24{,}648 = 25{,}56 \text{ рад/с};$$

$$P_\gamma = P_{\gamma\,\text{Kr-88}} \cdot C_{\text{Kr-88}} \cdot N_{\text{Kr-88}} + P_{\gamma\,\text{Kr-89}} \cdot C_{\text{Kr-89}} \cdot N_{\text{Kr-89}} =$$

$$= 501 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}04 + 414 \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}12 = 12{,}024 + 64{,}584 = 76{,}6 \text{ рад/с}.$$

Сумарна потужність дози дорівнює:

$$(P_\beta + P_\gamma) = 25{,}56 + 76{,}6 = 102{,}16 \text{ рад/с},$$

при цьому потужність дози γ-випромінювання перевищує потужність дози β-випромінювання:

$$\frac{P_\gamma}{P_\beta} = \frac{76{,}6}{25{,}56} = 3.$$

Відповідь: $P_\beta = 25{,}56$ рад/с; $P_\gamma = 76{,}6$ рад/с.

14. Людині зростом 160 см і вагою 60 кг ввели 0,06 мКі радіонукліда ^{210}Po з середньою енергією β^--випромінювання 2,28 МеВ. Визначить сумарну тканинну дозу β^-- і γ-випромінювань і співвідношення цих доз.

Дано:
$h = 160$ см
$m = 60$ кг
$C_0 = 0{,}06$ мКі
$E_\beta = 2{,}28$ МеВ
$f_2 = 1$ (все тіло)
$T_{эф} = 25$ діб (Табл. 2 Додатку)
$g = 122$ (Табл. 7 Додатку)
$K\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ Р·см^2/мКі·год (Табл. 6 Додатку)

Знайти: $\frac{Д_\beta}{Д_\gamma}$; $(Д_\beta + Д_\gamma)$

Рішення: Розрахунок ДВ проводиться за формулою:

$$Д_\beta = \frac{7{,}39 \cdot 10^4 \cdot \overline{E} \cdot C_0 \cdot T_{еф} \cdot f_2}{m}$$

$$= \frac{7{,}39 \cdot 10^4 \cdot 0{,}06 \cdot 2{,}28 \cdot 25 \cdot 1}{60000} = 4{,}21 \text{ рад.}$$

Розрахунок $Д_\gamma$ проводиться за формулою:

$$Д_\gamma = \frac{\tau \cdot K_\gamma \cdot g \cdot 97}{100 \cdot m}$$

де: K_γ – повна гамма постійна ^{210}Po рівна $5 \cdot 10^{-5}$ Р·см^2/мКі·год (взята з Табл. 6 Додатку «Повні γ-постійні радіонуклідів»;

g – геометричний чинник для радіонукліда, розподіленого в тілі людини: при h = 160 см і m = 60 кг q = 122 (взятий з табл. 7 Додатку «Середній геометричний чинник для γ-активного радіонукліда, рівномірно розподіленого в тілі людини»);

τ – середня тривалість життя радіонукліда, год. Значення τ визначається за величиною ефективного періоду напіввиведення $T_{еф}$ за формулою:

$$\tau = \frac{T_{еф}}{0{,}693} = \frac{25 \cdot 24}{0{,}693} = 865{,}8 \text{ год.}$$

Звідси: $$Д_{\gamma} = \frac{865{,}8 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 122 \cdot 97}{100 \cdot 60000} = 8{,}53 \cdot 10^{-5} \text{ рад.}$$

Тоді відношення доз складає

$$\frac{Д_{\beta}}{Д\gamma} = \frac{4{,}21}{8{,}53 \cdot 10^{-5}} = 49355{,}2$$

Сумарна тканинна доза дорівнює:

$$(Д_{\beta} + Д_{\gamma}) = 4{,}21 + 8{,}53 \cdot 10^{-5} \approx 4{,}21 \text{ рад.}$$

Відповідь: 49355,2; 4,21 рад.

Завдання для самоконтролю

1. Розрахуйте величину межі ефективної дози категорії В при інгаляційному шляху надходження ^{137}Cs (референтний тип *M*) в організм дорослої людини у вигляді аерозолю з медіанним по активності аеродинамічним діаметром 0,1 мкм. Відповідь: $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ Зв/рік.

2. Визначить уточнене значення допустимої концентрації ^{239}Pu в повітрі у вигляді аерозолю з медіанним по активності аеродинамічним діаметром 0,01 мкм референтного типу *S* при його надходженні в організм людини віком 10 років. Гранична ефективна доза складає $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Зв/рік. (Відповідь: $3{,}75 \cdot 10^{-4}$ Бк/м^3.

3. Визначить річне гранично допустиме надходження ^{144}Ce у критичний орган. Відповідь: 6,72 мкКі/рік.

4. Розрахуйте гранично допустиме річне надходження суміші радіонуклідів ^{90}Sr і ^{144}Ce в кістках людини при активностях відповідно 4% і 2,8%. Відповідь: 2,87 мкКі/рік.

5. Розрахуйте допустиму концентрацію ізотопів ^{60}Co в тілі людини, якщо $f_1 = 0{,}08$. Відповідь: $2{,}5 \cdot 10^{-11}$ Кі/л.

6. У щитовидній залозі людини відбулося накопичення ^{131}I з одночасним поглинанням 800 ерг енергії. Розрахуйте $Д_{екв}$ для даного органу. Відповідь: 0,02 Зв.

7. Визначить допустимий вміст радіонукліда ^{95}Zr з $E_{еф\ \beta^-} = 1{,}55$ МеВ і ГДД = $2{,}36 \cdot 10^{-9}$ бер за умови тривалості роботи 18 год/тижд. Відповідь: $7{,}93 \cdot 10^{-10}$ мкКі/орган.

8. Розрахуйте допустиму концентрацію суміші радіонуклідів ^{85}Kr і ^{135}Xe, з яких перший дає 20% у загальну активність при опромінюванні осіб категорії А в приміщенні об'ємом 250 м^3. Відповідь: $8 \cdot 10^{-8}$ Кі/л.

9. Розрахуйте потужність дози β^-- і γ-випромінювання при опроміненні на відкритій місцевості шкіри людини сумішшю РБГ, що складається з 0,8% ^{88}Kr і 3,6% ^{89}Kr при їх концентрації (Кі/л) відповідно: 6,2 і 8,5. Відповідь: 228,2 рад/с.

10. Людині вагою 69 кг і на зріст 170 см ввели 0,46 мКі ізотопу ^{131}I з середньою енергією β^--випромінювання 0,61 МеВ/розпад. Обчисліть сумарну дозу β^-- і γ-випромінювання Відповідь: 3,73 рад.

РОЗДІЛ 7. ВИВЕДЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ З ОРГАНІЗМУ

Теоретична частина

Найбільша кількість радіонуклідів виділяється через ШКТ, особливо елементи, які погано всмоктуються в травному тракті: трансуранові елементи, лантаноїди.

Розчинні сполуки радіонуклідів, а також ^{3}H, ^{137}Cs добре виділяються через нирки в першу добу. Відзначимо, що нирки – основний шлях виділення радіонуклідів.

Радіоактивні гази (^{3}H, ^{222}Rn, ^{133}Xe, ^{85}Kr), радіоактивні аерозолі і продукти розпаду Rn, Ra, Th виділяються через легені і шкіру.

Тривало затримуються в органах і тканинах ізотопи елементів з великою атомною масою, а також радіонукліди, що знаходяться в організмі в колоїдному стані (^{210}Po, ^{226}Ra, ^{238}U) і рідкоземельні елементи.

Зменшення вмісту радіонукліда в організмі може відбуватися не тільки унаслідок його виведення, але і завдяки радіоактивному розпаду, що особливо характерний для короткоживучих радіонуклідів ^{131}I, ^{24}Na, ^{32}P та інших. Важливо пам'ятати, що біологічне виведення і розпад – це два незалежні процеси, які, отже, мають і різні кількісні характеристики. Час, протягом якого з організму виділяється половина радіонукліда, що одноразово поступив, називають *біологічним періодом напіввиведення* – $T_б$. Фактичне же зменшення вмісту радіонукліда в організмі вимірюється *ефективним періодом напіввиведення* – $T_{еф}$ – це час, протягом якого організм звільняється від половини речовини, що депонує в нім, як шляхом біологічного виведення, так і унаслідок розпаду.

Два цих періоду зв'язані один з одним наступною формулою:

$$T_{еф} = \frac{T \cdot T_б}{T + T_б},$$

яка виведена із співвідношень:

$$\lambda_{еф} = \lambda + \lambda_б,$$

$$\lambda_{еф} = \frac{0{,}693}{T_{еф}},$$

$$\lambda_б = \frac{0{,}693}{T_б},$$

$$\lambda = \frac{0{,}693}{T},$$

де: $\lambda_{еф}$ – ефективна постійна радіоактивного розпаду і виведення;

$\lambda_б$ – постійна біологічного виведення даного радіонукліда, тобто частка даного радіонукліда, що виводиться за одиницю часу завдяки біологічним процесам.

Звідси:

$$T_{еф} = \frac{0{,}693}{\lambda_{еф}} = \frac{0{,}693}{\lambda + \lambda_б} = \frac{0{,}693}{0{,}693\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_б}\right)} = \frac{T \cdot T_б}{T + T_б}$$

Якщо $T >> T_б$, то $T_{еф} = T_б$, тобто для довгоживучих радіонуклідів $T_{еф}$ визначається біологічним виведенням і хімічною, а не радіаційною токсичністю. Наприклад, для α-випромінювачів ^{144}Nd ($T = 2{,}4 \cdot 10^{15}$ років), ^{147}Sm ($1{,}05 \cdot 10^{11}$ років), ^{147}Hf ($2 \cdot 10^{15}$ років).

У випадку β^--випромінювачів з $T > n \cdot 10^5$ років також неможливо отримати гостролетальний ефект за рахунок радіаційної дії, оскільки на перший план виступатиме хімічна токсичність елементу. Так, для отримання гостролетальної дії від ^{40}К ($T = 1{,}28 \cdot 10^9$ років) необхідно було б вводити його в кількості 155000 кБк на щура, що по масі (620 г) в 3 рази перевищує масу щура. Інший приклад полягає в тому, що гостролетальна дія ^{129}I ($T = 1{,}57 \cdot 10^7$ років) за рахунок β^--розпаду можна чекати при введенні його в кількості 886000 кБк на щура.

І навпаки, якщо $T << T_б$, то $T_{еф} = T$.

Таким чином, при інкорпорації радіонукліда в гостролетальних дозах ($ЛД_{50/30}$) для радіонуклідів:

з $T > 10^6$ років на перший план виступатиме їх хімічна токсичність;

з $T = 10^5$ років в рівній мірі виявлятиметься радіаційна і хімічна токсичність;

з $T < 10^4$ і 10^3 років – переважає радіаційна токсичність.

Приклади вирішення завдань

1. Визначить біологічний період напіввиведення ^{144}Ce з нирок і постійні виведення даного радіонукліда біологічну та ефективну.

Дано:	Рішення:
T = 284,5 діб	З вихідних величин найпростіше знайти $\lambda_{еф}$

$T_{еф}$ = 191 доба	виходячи із співвідношення $\lambda_{еф} = \frac{0{,}693}{T_{еф}}$. Значення
Знайти: $T_б$, $\lambda_б$, $\lambda_{еф}$.	$T_{еф}$ приведене в табл. 2 Додатку, для нирок $T_{еф}$ = 191 доба, що внесене до «Дано».
	Тоді: $\lambda_{еф} = \frac{0{,}693}{191} = 3{,}62 \cdot 10^{-3}$ доб$^{-1}$.

Аналогічно знаходимо λ:

$$\lambda = \frac{0{,}693}{T} = \frac{0{,}693}{284{,}5} = 2{,}43 \cdot 10^{-3} \text{ доб}^{-1}.$$

Значення T взяте з табл. 2 Додатку. Маючи величини λ та $\lambda_{еф}$, знаходимо:

$$\lambda_б = \lambda_{еф} - \lambda = (3{,}62 - 2{,}43) \cdot 10^{-3} = 1{,}19 \cdot 10^{-3} \text{ доб}^{-1}.$$

Величина: $$T_б = \frac{0{,}693}{\lambda_б} = \frac{0{,}693}{1{,}19 \cdot 10^{-3}} = 563 \text{ дні}.$$

Відповідь: $T_б$ = 563 дн.; $\lambda_б = 1{,}19 \cdot 10^{-3}$ доб$^{-1}$; $\lambda_{еф} = 3{,}62 \cdot 10^{-3}$ доб$^{-1}$.

2. Визначить в якому органі найтриваліше затримується ^{210}Po? Як можна виявити ^{210}Po в організмі? Як можна прискорити його виведення з організму?

Рішення: Показником, що характеризує затримку радіоізотопу в органі, є $T_б$.

У разі ^{210}Po: $$T_б = \frac{T \cdot T_{еф}}{T - T_{еф}} = \frac{138{,}4 \cdot 46}{138{,}4 - 46} = 70 \text{ діб}.$$

Значення T і $T_{еф}$ для ^{210}Po взяті з табл. 2 Додатку. До речі, нирки є органом, в якому ^{210}Po накопичується в більшій кількості, про це судять по коефіцієнту f_2 (1,13), приведеному в таблиці 2 Додатку. f_2 – це частка радіонукліда, що утримується яким-небудь органом.

^{210}Po як α-випромінювач можна виявити непрямим методом по аналізу калу або сечі, переважно калу, оскільки ^{210}Po виводиться через ШКТ.

Виведення ^{210}Po з організму можна прискорити методом іонного антагонізму, ввівши сполуки елементів VI групи Телура, Селену, Сульфуру. Виходячи з даних табл. 2 Додатку, видно, що ^{210}Po найефективніше виводиться з кісток ($T_{еф}$ = 20 діб).

Завдання для самоконтролю

1. Розрахуйте величини $T_б$, $\lambda_б$ і $\lambda_{еф}$ при виведенні ізотопа ^{137}Cs із кісткової тканини людини. Дайте визначення кожному параметру. Відповідь: 138,6 діб; 0,005 діб$^{-1}$; 0,0051 діб$^{-1}$.

2. Розрахуйте величини $T_б$, $\lambda_б$ і $\lambda_{еф}$ при виведенні ^{60}Co із критичного органу людини. Дайте визначення кожному параметру. Відповідь: 9.56 діб; 0,0725 діб$^{-1}$; 0,0729 діб$^{-1}$.

Література

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). – Київ, 1998. – 159 с.

2. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ – 2005): наказ МІНІСТЕРСТВА ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ від 02.02.2005 № 54. [Електронний ресурс]. http://ecopravo.org.ua/2011/07/15/ospu--2005/ (дата доступу: 28.08. 2022).

3. Кутлахмедов Ю.О. Основи радіоекології. – Київ: Вища школа, 2003. – 319 с.

4. Гродзинський Д.М. Радіобіологія: підручник. – Київ: Либідь, 2000. – 448 с.

5. Гудков І.М. Радіобіологія: підручник для вищ. навчальних закладів. – Київ: НУБіП України, 2016. – 485 с.

6. Клименко М.О., Клименко О.М., Клименко Л.В. Радіоекологія: підручник. – Рівне: НУВГП, 2020. – 304 с.

7. Радіоекологія: підручник / Ю. Г. Масікевич та ін. – Чернівці: Місто, 2018. – 449 с.

8. Сільськогосподарська радіоекологія: підручник / за ред. І. М. Гудкова. – Київ: Вид-во «Ліра-К», 2017. – 268 с.

9. Хоботова Е.Б. Радіоекологія: навчальний посібник / Е.Б. Хоботова, І.В. Грайворонська, М.І. Уханьова. – Харків: ХНАДУ, 2013. – 188 с.

10. Іванов Є. Радіоекологічні дослідження: навч. посібник. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. – 149 с. 11. Константінов М.П., Журбенко О.А. Радіаційна безпека: навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2003. – 151 с.

11. Хоботова Е. Б. Радіоекологія. Біологічна дія радіації : навчальний посібник / Е.Б. Хоботова. – Харків : ХНАДУ, 2023. – 156 с.

ДОДАТОК

Таблиця 1

Допустимі концентрації радіонуклідів в повітрі PC^{inhal} і питній воді PC^{ingest} для категорії В

Радіонуклід	Період напіврозпаду	PC^{inhal}, Бк · м$^{-3}$	PC^{ingest}, Бк · м$^{-3}$
^{90}Sr	29,12 років	0,2	10^4
^{137}Cs	30 років	0,8	10^5
^{239}Pu	$2{,}4 \cdot 10^4$ років	$4 \cdot 10^{-4}$	10^3

Таблиця 2

Біологічні та фізичні константи деяких радіонуклідів

Нуклід, період напів-розпаду	Розчинність сполуки	Критичний орган	Період напіввиведення, $T_{еф}$, доба	Частка нукліду в критичному органі, f_2	$ДС_А$, Бк	Група радіаційної небезпеки
1	2	3	4	5	6	7
^{60}Co 5,25 р.	Р	Все тіло Печінка Селезінка Підшлункова залоза	9,5 9,5 9,5 9,5	1,0 0,02 $1,1\cdot10^{-3}$ $2,0\cdot10^{-3}$	$4,81\cdot10^{3}$ - - -	В
^{90}Sr 28,6 р.	Р Р НР	Все тіло Кістки Легені, ШКТ	5700 $6,4\cdot10^{3}$ $6,4\cdot10^{3}$	1,0 0,99 -	- $7,4\cdot10^{4}$ $2,8\cdot10^{4}$	Б
^{90}Y 2,68 доб.	- -	Все тіло Кістки	2,68 2,68	1,0 0,75	- -	В
^{95}Zr 65 доб.	Р	Все тіло Кістки Нирки Селезінка Печінка	55,5 59,5 59,5 59,0 53,0	1,0 0,38 0,02 $6,4\cdot10^{-3}$ 0,07	$6,66\cdot10^{3}$ - - - -	В
^{235}U $7,1\cdot10^{8}$ р.	Р	Все тіло Нирки Кістки	100 15 300	1,0 0,065 0,85	- 37 $8,88\cdot10^{2}$	Б

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
^{131}I 8,06 доб.	Р	Все тіло Щитовидна залоза Нирки Печінка Селезінка	7,6 7,6 3,73 3,73 3,73	1,0 0,2 0,02 0,06 0,0025	- $2{,}59\cdot10^{3}$ - - -	Б
^{137}Cs 30 р.	Р	Все тіло М'язи Легені Нирки Селезінка Печінка Кістки	70 138 138 42 97 89 137	1,0 0,79 $6\cdot10^{-3}$ $6\cdot10^{-3}$ $7\cdot10^{-3}$ 0,09 0,08	$1{,}22\cdot10^{6}$ $5{,}18\cdot10^{5}$ $7{,}4\cdot10^{4}$ - $1{,}258\cdot10^{4}$ $1{,}295\cdot10^{5}$ -	В
^{144}Ce 284,5 доб.	Р	Все тіло Кістки Печінка Нирки	191 243 146 191	1,0 0,38 0,19 0,02	- $6{,}29\cdot10^{4}$ - -	Б
^{210}Po 138,4 доб.	Р	Все тіло Нирки Селезінка Печінка Кістки	25 46 42 32 20	1,0 1,13 0,07 0,22 0,08	- $8{,}14\cdot10^{2}$ $4{,}07\cdot10^{2}$ - $7{,}4\cdot10^{2}$	А
^{226}Ra 1600 р.	Р Р НР	Кістки Нирки Легені	44 р. 44 р. 44 р.	- - -	$1{,}887\cdot10^{3}$ 4,07·10 $1{,}332\cdot10^{2}$	А
^{228}Th 1,9 р.	Р НР	Кістки Легені	693 693	- -	210 63	А

Таблиця 3

Маси органів умовної людини

Орган	Маса, г
Все тіло	70000
М'язи скелета	28000
Кісткова тканина	5000
Кістковий мозок	3000
Стравохід	40
Шлунок	150
Кишечник	1000
Тонкий кишечник	640
Печінка	1800
Легені	1000
Нирки	310
Серце	330
Селезінка	180
Щитовидна залоза	20

Таблиця 4

Потужність дози, що створюється в критичних органах людини (шкіра, підшкірні тканини, все тіло) зовнішнім бета- і гама-випромінюванням окремих радіонуклідів РБГ, що містяться в повітрі приміщень різного об'єму і на відкритій місцевості рад·л/(с·Кі) (для шкіри і підшкірної тканини вказана потужність дози β-випромінювання, а для всього тіла – потужність дози γ-випромінювання) при концентрації 1 Кі/л

$V_{приміщ}$	7м^3			50 м^3			250 м^3			2000 м^3			17000м^3			На відкритій місцевості		
Нуклід	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ	β		γ
	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло	шкіра	підшкір.	тіло
^{41}Ar	78	19	1,5	79	19,4	3,0	80	19,7	4,9	80	19,8	10	80	19,8	20	80	19,8	315
^{85}Kr	34	1,3	0,1	35	1,4	0	35	1,4	0,01	35	1,4	0,002	35	1,4	0,004	35	1,4	0,5
^{85m}Kr	43	4,4	0,3	44	5	0,50	45	5,2	0,85	45	5,2	1,7	45	5,2	3,4	45	5,2	38,6
^{87}Kr	85	51	0,8	117	68,3	1,6	169	107	2,8	219	145	5,5	228	152	11	228	152	191
^{88}Kr	47	16	2,2	63	24,6	4,3	76	33,5	7,0	83	38	14	84	38	28	84	38	501
^{89}Kr	67	40	2,3	125	74	4,5	175	113	7,6	226	150	15	237	158	30	237	158	414
^{133}Xe	11	0,02	0,11	11	0,02	0,2	11	0,02	0,35	11	0,02	1	11	0,02	1,3	11	0,02	11,1
^{133m}Xe	31	0,15	0,1	37	0,2	0,3	40	0,25	0,40	42	0,3	0,8	42	0,3	1,4	42	0,3	8,7
^{135}Xe	50	5,4	0,3	53	6,2	0,6	53	6,2	1,0	53	6,2	1,9	53	6,2	3,8	53	6,2	59
^{135m}Xe	24	0,07	0,6	27	0,1	1,1	27	0,15	1,9	27	0,15	3,7	27	0,15	7,3	27	0,15	104
^{137}Xe	66	41	0,2	130	83	0,4	195	131	0,76	250	177	1,4	257	177	3,0	257	177	45,2
^{138}Xe	91	55	1,2	131	71	2,3	162	90	4,0	172	96	7,9	172	96	15	172	96	264

Таблиця 5

Допустима концентрація ДК радіонуклідів РБГ робочих приміщень, що містяться в повітрі і на відкритій місцевості, Кі/л

Радіонуклід	Критичний орган	Об'єм приміщення, $м^3$					Відкрита місцевість	
		7	50	250	2000	17000	Категорія А	–
^{41}Ar	шкіра	$5{,}2\cdot10^{-8}$	$5{,}0\cdot10^{-8}$	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}6\cdot10^{-8}$	$4{,}1\cdot10^{-8}$	$1{,}0\cdot10^{-8}$	$2{,}3\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$1{,}0\cdot10^{-7}$	$9{,}2\cdot10^{-8}$	$8{,}4\cdot10^{8}$	$6{,}9\cdot10^{-8}$	$5{,}0\cdot10^{-8}$	$6{,}1\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-10}$
	гонади	$4{,}5\cdot10^{-7}$	$2{,}2\cdot10^{-7}$	$1{,}3\cdot10^{-7}$	$6{,}8\cdot10^{-8}$	$3{,}4\cdot10^{-8}$	$2{,}1\cdot10^{-9}$	$4{,}9\cdot10^{-11}$
^{85}Kr	шкіра	$1{,}2\cdot10^{-7}$	$1{,}2\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$2{,}6\cdot10^{-9}$
	підшк. тк.	$1{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$2{,}4\cdot10^{-8}$
	гонади	$2{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	$6{,}9\cdot10^{-5}$	$3{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}7\cdot10^{-5}$	$1{,}2\cdot10^{-6}$	$2{,}8\cdot10^{-8}$
^{85m}Kr	шкіра	$9{,}6\cdot10^{-8}$	$9{,}3\cdot10^{-8}$	$9{,}0\cdot10^{-8}$	$8{,}9\cdot10^{-8}$	$8{,}5\cdot10^{-8}$	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$1{,}1\cdot10^{-9}$
	підшк. тк.	$4{,}4\cdot10^{-7}$	$3{,}7\cdot10^{-7}$	$3{,}4\cdot10^{-7}$	$3{,}0\cdot10^{-7}$	$2{,}3\cdot10^{-7}$	$4{,}6\cdot10^{-8}$	$1{,}0\cdot10^{-9}$
	гонади	$2{,}6\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-6}$	$7{,}9\cdot10^{-7}$	$4{,}0\cdot10^{-7}$	$1{,}9\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{-8}$	$4{,}0\cdot10^{-10}$
^{87}Kr	шкіра	$4{,}8\cdot10^{-8}$	$3{,}5\cdot10^{-8}$	$2{,}4\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$1{,}7\cdot10^{-8}$	$9{,}8\cdot10^{-9}$	$2{,}2\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$4{,}0\cdot10^{-8}$	$2{,}9\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	$1{,}2\cdot10^{-8}$	$6{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-10}$
	гонади	$8{,}0\cdot10^{-7}$	$4{,}0\cdot10^{-7}$	$2{,}4\cdot10^{-7}$	$1{,}2\cdot10^{-7}$	$6{,}0\cdot10^{-8}$	$3{,}5\cdot10^{-9}$	$8{,}1\cdot10^{-11}$
^{88}Kr	шкіра	$8{,}4\cdot10^{-8}$	$6{,}1\cdot10^{-8}$	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}2\cdot10^{-8}$	$3{,}6\cdot10^{-8}$	$7{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}6\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$7{,}1\cdot10^{-8}$	$5{,}0\cdot10^{-8}$	$3{,}9\cdot10^{-8}$	$3{,}0\cdot10^{-8}$	$3{,}8\cdot10^{-9}$	$8{,}6\cdot10^{-11}$
	гонади	$3{,}1\cdot10^{-7}$	$1{,}5\cdot10^{-7}$	$9{,}2\cdot10^{-8}$	$4{,}6\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-9}$	$3{,}1\cdot10^{-11}$
^{89}Kr	шкіра	$6{,}0\cdot10^{-8}$	$3{,}2\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}7\cdot10^{-8}$	$1{,}5\cdot10^{-8}$	$5{,}5\cdot10^{-9}$	$1{,}2\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$2{,}6\cdot10^{-8}$	$1{,}7\cdot10^{-8}$	$1{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$3{,}0\cdot10^{-9}$	$7{,}0\cdot10^{-11}$
	гонади	$2{,}9\cdot10^{-7}$	$1{,}4\cdot10^{-7}$	$8{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}4\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-9}$	$3{,}0\cdot10^{-11}$
^{133}Xe	шкіра	$3{,}9\cdot10^{-7}$	$3{,}8\cdot10^{-7}$	$3{,}7\cdot10^{-7}$	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$3{,}4\cdot10^{-7}$	$1{,}9\cdot10^{-7}$	$4{,}3\cdot10^{-9}$
	підшк. тк.	$1{,}5\cdot10^{-5}$	$8{,}6\cdot10^{-6}$	$5{,}3\cdot10^{-6}$	$2{,}7\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-6}$	$1{,}8\cdot10^{-7}$	$4{,}2\cdot10^{-9}$
	гонади	$6{,}3\cdot10^{-6}$	$3{,}1\cdot10^{-6}$	$1{,}8\cdot10^{-6}$	$9{,}2\cdot10^{-7}$	$4{,}6\cdot10^{-7}$	$6{,}1\cdot10^{-8}$	$4{,}3\cdot10^{-9}$
^{133m}Xe	шкіра	$1{,}3\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$1{,}0\cdot10^{-7}$	$9{,}8\cdot10^{-8}$	$9{,}6\cdot10^{-8}$	$8{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-9}$
	підшк. тк.	$7{,}4\cdot10^{-6}$	$4{,}5\cdot10^{-6}$	$3{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}7\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$2{,}2\cdot10^{-7}$	$5{,}1\cdot10^{-9}$
	гонади	$5{,}3\cdot10^{-6}$	$2{,}6\cdot10^{-6}$	$1{,}6\cdot10^{-6}$	$8{,}0\cdot10^{-7}$	$3{,}9\cdot10^{-7}$	$7{,}8\cdot10^{-8}$	$1{,}7\cdot10^{-9}$
^{135}Xe	шкіра	$8{,}2\cdot10^{-8}$	$7{,}7\cdot10^{-8}$	$7{,}6\cdot10^{-8}$	$7{,}5\cdot10^{-8}$	$7{,}1\cdot10^{-8}$	$3{,}6\cdot10^{-8}$	$8{,}3\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$3{,}0\cdot10^{-7}$	$2{,}8\cdot10^{-7}$	$2{,}5\cdot10^{-7}$	$2{,}0\cdot10^{-7}$	$3{,}0\cdot10^{-8}$	$7{,}0\cdot10^{-10}$
	гонади	$2{,}2\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	$6{,}8\cdot10^{-7}$	$3{,}4\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$2{,}5\cdot10^{-10}$
^{133m}Xe	шкіра	$1{,}6\cdot10^{-7}$	$1{,}4\cdot10^{-7}$	$1{,}4\cdot10^{-7}$	$1{,}3\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$3{,}1\cdot10^{-8}$	$7{,}1\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$3{,}1\cdot10^{-6}$	$1{,}6\cdot10^{-6}$	$9{,}8\cdot10^{-7}$	$5{,}1\cdot10^{-7}$	$2{,}6\cdot10^{-7}$	$1{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}4\cdot10^{-10}$
	гонади	$1{,}1\cdot10^{-6}$	$5{,}8\cdot10^{-7}$	$3{,}5\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$8{,}8\cdot10^{-8}$	$6{,}5\cdot10^{-9}$	$1{,}4\cdot10^{-10}$
^{137}Xe	шкіра	$6{,}2\cdot10^{-8}$	$3{,}6\cdot10^{-8}$	$2{,}1\cdot10^{-8}$	$1{,}6\cdot10^{-8}$	$1{,}6\cdot10^{-8}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$	$3{,}1\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$5{,}0\cdot10^{-6}$	$2{,}4\cdot10^{-8}$	$1{,}5\cdot10^{-8}$	$1{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$	$9{,}3\cdot10^{-9}$	$2{,}1\cdot10^{-10}$
	гонади	$2{,}8\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$8{,}7\cdot10^{-7}$	$4{,}4\cdot10^{-7}$	$2{,}2\cdot10^{-7}$	$1{,}4\cdot10^{-8}$	$3{,}4\cdot10^{-10}$
^{138}Xe	шкіра	$4{,}5\cdot10^{-8}$	$3{,}1\cdot10^{-8}$	$2{,}5\cdot10^{-8}$	$2{,}3\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$9{,}3\cdot10^{-9}$	$2{,}1\cdot10^{-10}$
	підшк. тк.	$3{,}7\cdot10^{-8}$	$2{,}8\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-8}$	$1{,}9\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$5{,}7\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-10}$
	гонади	$5{,}7\cdot10^{-7}$	$2{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$8{,}5\cdot10^{-8}$	$4{,}2\cdot10^{-8}$	$2{,}5\cdot10^{-9}$	$5{,}8\cdot10^{-11}$

Таблиця 6

Повні γ–сталі радіонуклідів, Р·см^2/(год.·мКі)

Радіонуклід	K_γ	Радіонуклід	K_γ	Радіонуклід	K_γ
^{7}Be	0,325	^{85}Sr	2,94	^{140}Ba	1,16
^{16}N	15,28	^{87m}Sr	1,72	^{140}La	11,14
^{19}O	5,07	^{89}Sr + ^{89m}Y	$5\cdot10^{-4}$	^{141}Ce	0,292
^{22}Na	11,89	^{91}Sr + ^{91m}Y	5,98	^{144}Ce	0,04
^{24}Na	18,55	^{90}Sr	6,60	^{147}Nd	0,756
^{28}Mg	7,72	^{91}Y	0,019	^{144}Pm	8,62
^{41}Ar	6,58	^{98}Zr	1,98	^{155}Sm	0,439
^{40}K	0,80	^{95}Zr + ^{85m}Nb	4,10	^{147}Eu	11,6
^{42}K	1,36	^{95}Nb	4,31	^{156}Eu	6,14
^{47}Ca	5,50	^{93m}Mo	11,36	^{185}W	$3\cdot10^{-4}$
^{49}Ca	12,82	^{99}Mo + ^{99m}Tc	1,23	^{187}W	2,85
^{44}Sc	11,82	^{103}Ru +^{103m}Rh	1,22	^{192}Ir	4,65
^{46}Sc	10,87	^{106}Ru +^{106m}Rh	1,54	^{195}Au	0,028
^{47}Sc	0,45	^{105}Ag	6,71	^{196}Au	2,39
^{48}Sc	17,61	^{125m}Sn	0,584	^{198}Au +^{198m}Hg	2,30
^{51}Cr	0,165	^{125}Sn	1,99	^{193m}Hg +^{193}Hg	0,552
^{52}Mn	18,03	^{121}I	2,18	^{193}Hg	0,102
^{54}Mn	4,69	^{122}I	4,84	^{197m}Hg	0,322
^{56}Mn	8,28	^{132}I	0,685	^{197}Hg	0,109
^{59}Fe + ^{59m}Co	6,25	^{124}I	7,11	^{199m}Hg	1,34
^{56}Co	17,40	^{125}I	$2\cdot10^{-3}$	^{203}Hg	1,25
^{57}Co	0,576	^{126}I	2,27	^{210}Pb	$9{,}9\cdot10^{-4}$
^{58}Co	5,47	^{128}I	0,521	^{212}Pb	0,664
^{60}Co	12,93	^{129}I	0,020	^{212}Bi	0,567
^{57}Ni	10,07	^{130}I	13,59	^{210}Po	$5\cdot10^{-5}$
^{65}Ni	2,23	^{131}I	2,15	^{220}Rn	0,001
^{64}Cu	1,12	^{132}I	11,55	^{222}Rn	0,002
^{67}Cu	0,545	^{133}I	3,80	^{224}Ra	0,039
^{62}Zn	1,79	^{134}I	12,60	^{226}Ra	9,36
^{65}Zn	3,02	^{135}I + ^{135m}Xe	7,55	в рівновазі з основними ДПР	
^{64}Ga	13,90	^{136}I	14,01		
^{66}Ga	11,89	^{127}Xe	1,38	^{230}Th	0,003
^{72}Ga	15,70	^{129m}Xe	0,104	^{232}Th	0,067
^{74}As	4,43	^{131m}Xe	0,019	^{234}Th	0,028
^{76}As	1,98	^{133m}Xe	0,195	^{230}U	0,005
^{72}Se	0,24	^{133}Xe	0,145	^{235}U	0,741
^{75}Se	1,94	^{135}Xe	1,34	^{238}U	0,072
^{76}Br	10,55	^{126}Cs	5,54	^{239}Np	0,931
^{82}Br	14,47	^{128}Cs	4,20	^{238}Pu	0,002
^{77}Kr	5,64	^{129}Cs	1,36	^{239}Pu	$3{,}6\cdot10^{-5}$
^{79}Kr	1,17	^{130}Cs	5,81	^{241}Am	0,630
^{85m}Kr	0,804	^{132}Cs	3,97	^{242}Cm	$1{,}8\cdot10^{-4}$
^{85}Kr	0,021	^{134m}Cs	0,159		
^{87}Kr	5,03	^{134}Cs	8,58		
^{84}Rb	4,55	^{136}Cs	12,62		
^{86}Rb	0,55	^{137}Cs + ^{137m}Ba	3,10		
^{85m}Sr	1,10	^{138}Cs	10,77		

Таблиця 7

Середній геометричний чинник для γ–активного радіонукліда рівномірно розподіленого в тілі людини

Маса людини, кг	Зріст людини, см						
	200	190	180	170	160	150	140
100	138	139	142	145	147	150	154
90	134	136	138	140	143	146	148
80	129	130	131	134	136	139	141
70	123	124	125	126	129	131	135
60	117	118	119	120	122	125	128
50	112	113	114	116	117	119	122
40	102	104	105	106	108	109	110

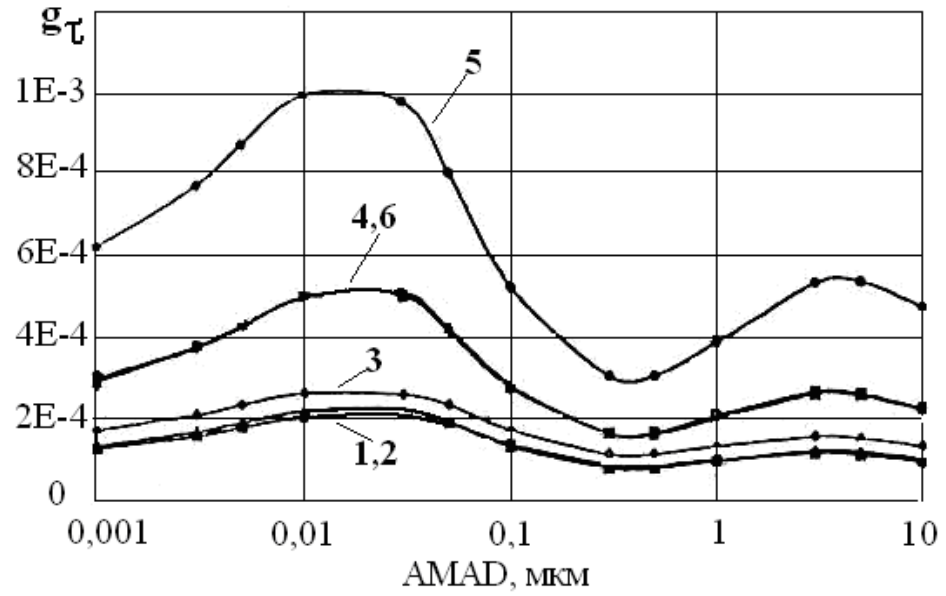


Рис. 1. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{90}Sr (референтний тип *F*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий.

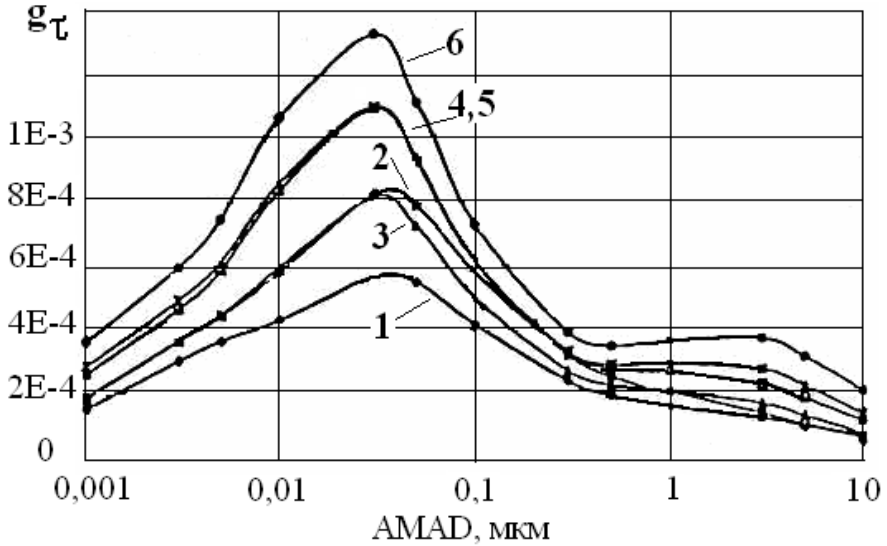


Рис. 2. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{90}Sr (референтний тип *M*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

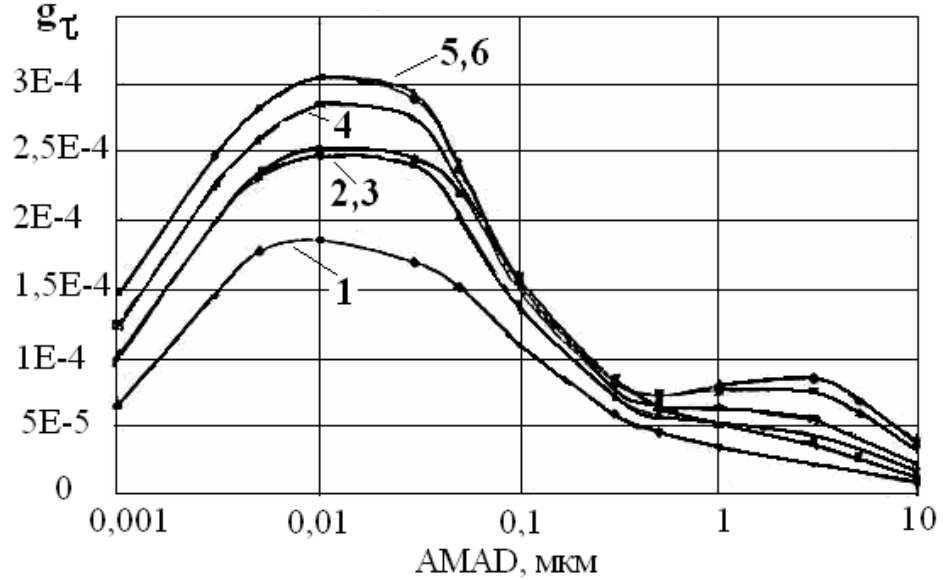


Рис. 3. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{90}Sr (референтний тип *S*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

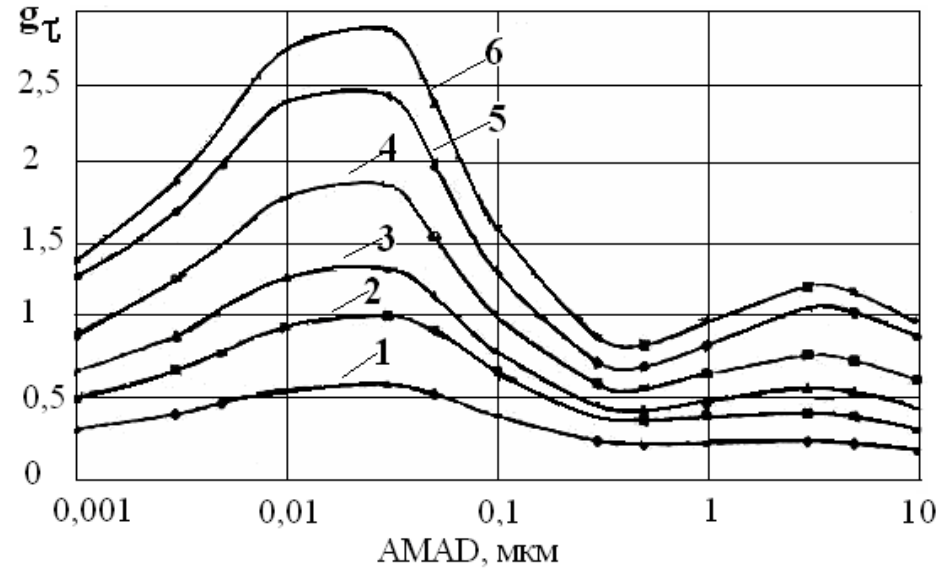


Рис. 4. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{137}Cs (референтний тип *F*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

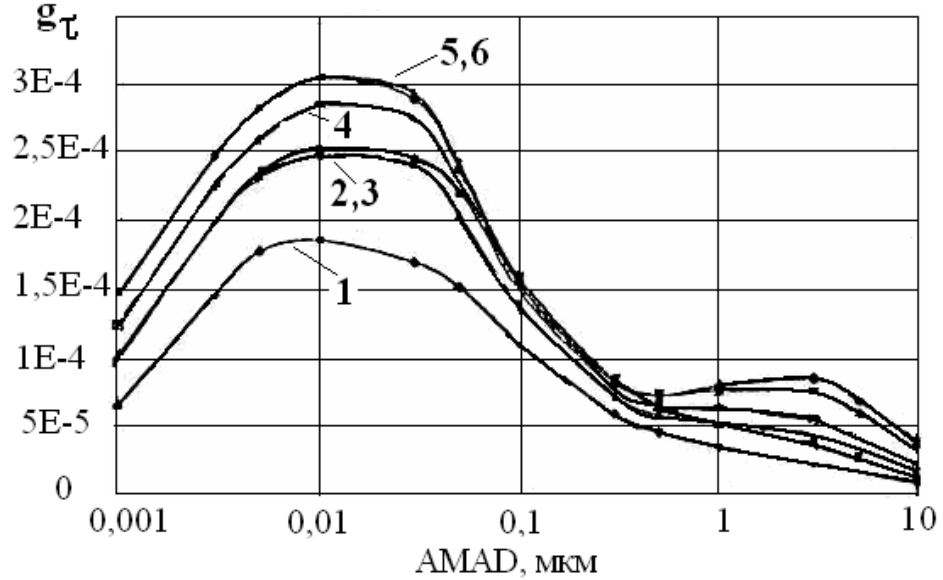


Рис. 5. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{137}Cs (референтний тип *M*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

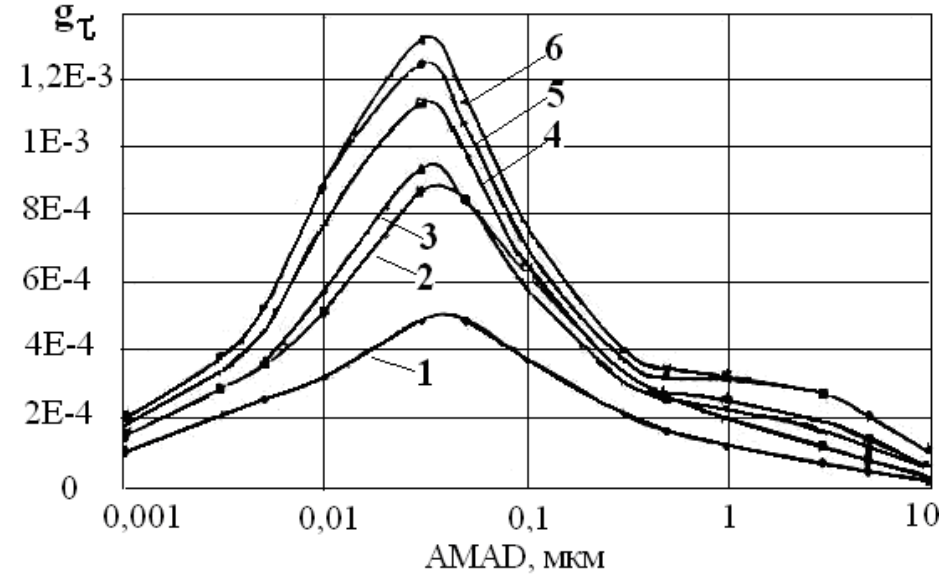


Рис. 6. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{137}Cs (референтний тип *S*) залежно від AMAD і віку: 1- 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4- 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

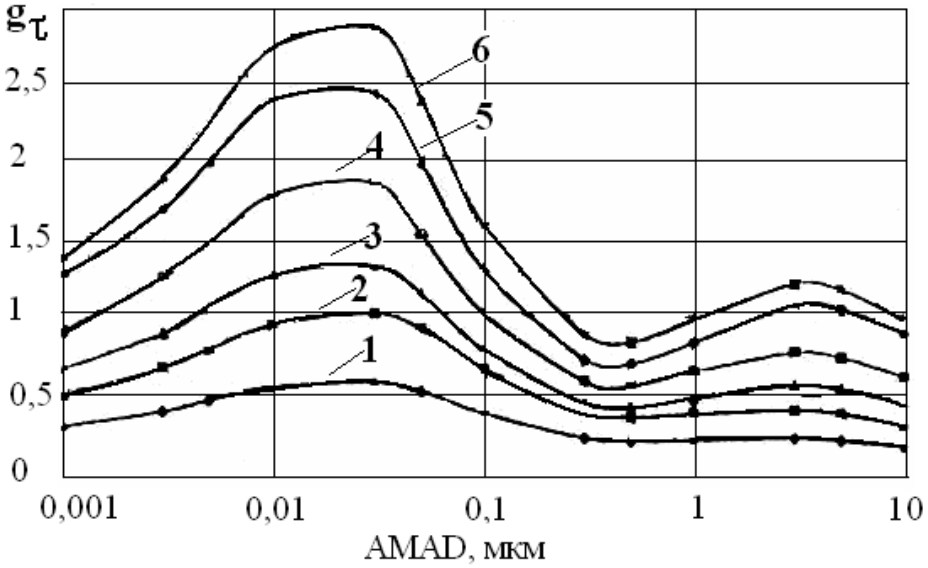


Рис. 7. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{239}Pu (референтний тип *F*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

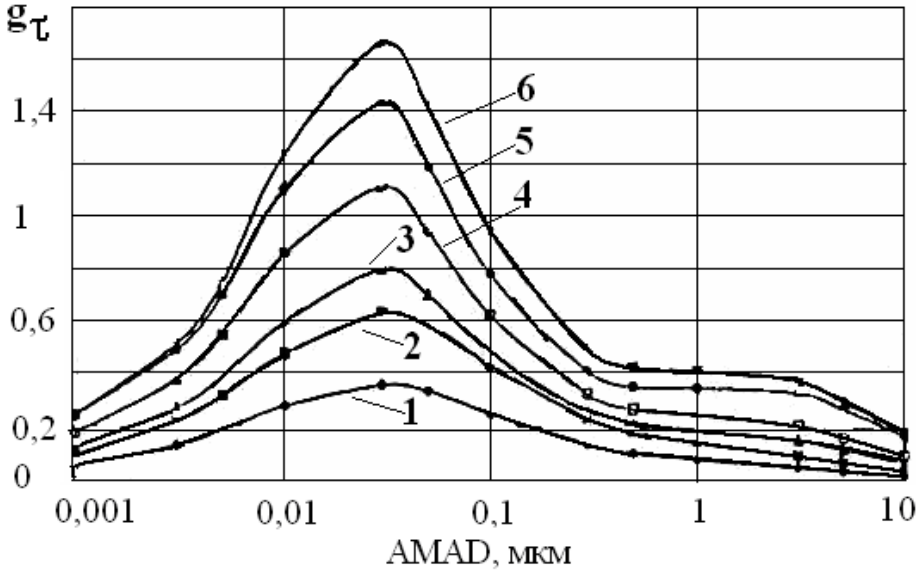


Рис. 8. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{239}Pu (референтний тип *M*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

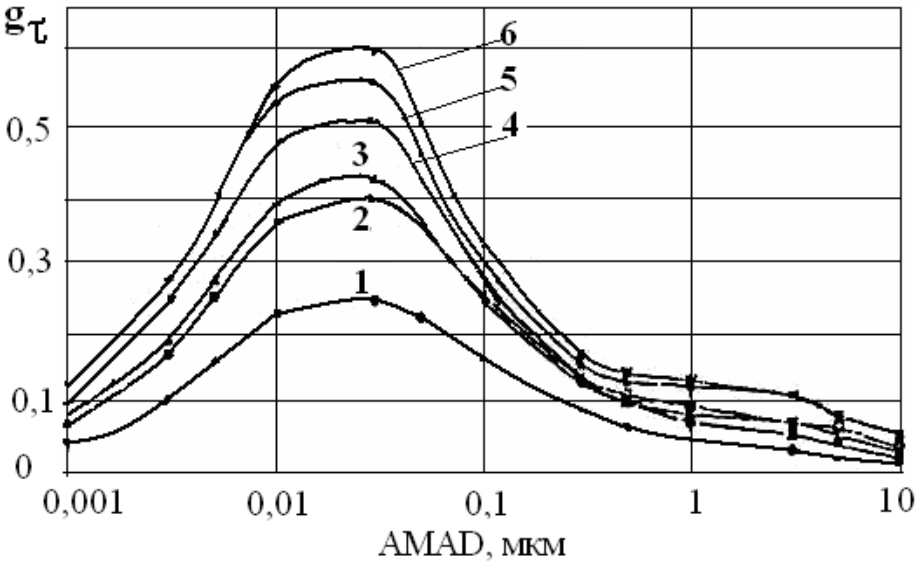


Рис. 9. Доза на одиницю концентрації у повітрі g_τ, Зв·рік$^{-1}$·Бк$^{-1}$·м^3 при інгаляції ^{239}Pu (референтний тип *S*) залежно від AMAD і віку: 1 – 3 місяці; 2 – 1 рік; 3 – 5 років; 4 – 10 років; 5 – 15 років; 6 – дорослий

ЗМІСТ

ВСТУП..... 3
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ МІГРАЦІЇ ШТУЧНИХ РАДІОНУКЛІДІВ ПО ТРОФІЧНИХ РІВНЯХ..... 4
Теоретична частина..... 4
Приклади вирішення завдань..... 9
Завдання для самоконтролю..... 19
РОЗДІЛ 2. ПРОГНОЗУВАННЯ ВІРОГІДНОГО РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ..... 20
Теоретична частина..... 20
Приклади вирішення завдань..... 23
Завдання для самоконтролю..... 26
РОЗДІЛ 3. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА РАДІОЧУТЛИВОСТІ..... 26
Теоретична частина..... 26
Приклади вирішення завдань..... 30
Завдання для самоконтролю..... 34
РОЗДІЛ 4. ВІДНОСНА БІОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ (ВБЕ)..... 35
Теоретична частина..... 35
Приклади вирішення завдань..... 36
Завдання для самоконтролю..... 37
РОЗДІЛ 5. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ РАДІАЦІЇ ТА ІНШИХ ЧИННИКІВ..... 38
Теоретична частина..... 38
Приклади вирішення завдань..... 40
Завдання для самоконтролю..... 47
РОЗДІЛ 6. ДОЗОВІ МЕЖІ ОПРОМІНЕННЯ. ДОПУСТИМІ КОНТРОЛЬНІ РІВНІ ЯК ОСНОВА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ.... 48
Теоретична частина..... 48
6.1 Основні регламентовані величини..... 48
6.2 Межі доз і допустимі рівні..... 50
6.3 Допустимі рівні..... 51
6.4 Допустимі рівні внутрішнього опромінення. Розрахунок гранично допустимого річного надходження радіонуклідів..... 55

6.5 Розрахунок допустимої концентрації радіонуклідів..... 56
6.6 Розрахунок допустимого вмісту радіонукліда в організмі... 57
6.7 Розрахунок допустимих рівнів внутрішнього опромінення для суміші радіонуклідів..... 59
6.8 Розрахунок ДК і потужності дози радіонуклідів благородних газів..... 59
6.9 Поглинена тканинна доза..... 60
Приклади вирішення завдань..... 62
Завдання для самоконтролю…… 74
РОЗДІЛ 7. ВИВЕДЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ З ОРГАНІЗМУ..... 75
Теоретична частина..... 75
Приклади вирішення завдань..... 77
Завдання для самоконтролю…… 79
ЛІТЕРАТУРА……..... 80
ДОДАТОК..... 81