

Затверджено науково-методичною
радою ЖДТУ
протокол від «19» листопада 2018 р. № 6

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
для проведення практичних та самостійних робіт
з навчальної дисципліни
«РАДІАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ»
для студентів освітнього рівня «МАГІСТР»
денної форми навчання
спеціальності 101 «Екологія»
гірничо-екологічний факультет
кафедра екології

Розглянуто і рекомендовано
на засіданні кафедри екології
протокол від «27» жовтня 2018 р.
№ 3

Розробник: проф. кафедри екології Вінчук М.М.

Житомир
2018 р.

Зміст	Стор.
Тема 1. Електромагнітне випромінювання	3
Тема 2. Радіоактивний розпад та випромінювання	7
Тема 3. Оцінка іонізуючого випромінювання та дозових навантажень за даними радіоекологічного моніторингу	11
Тема 4. Оцінка інтенсивності γ - випромінювання з допомогою дозиметра RDS-30	17
Тема 5. Основи розрахунків загальної ефективної дози опромінення	20
Тема 6. Вимоги до обробки результатів вимірювань	27
Література	33
Додатки	34

Тема 1. Електромагнітне випромінювання.

1.1. *Електромагнітне випромінювання* – це взаємопов'язані коливання електричного (Е) і магнітного (В) полів, що утворюють електромагнітне поле (ЕМП).

Розповсюдження випромінювання здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль (потік фотонів), який тільки при великій їх кількості можна розглядати як неперервний процес.

Електромагнітні поля негативно впливають на організм людини. Переважна частина населення знаходиться в умовах підвищеної активності ЕМП. Разом з тим в діапазоні промислових частот (у т. ч. 50 Гц або 50 коливань за 1 сек.) як магнітна так і електрична складові поля на біологічний об'єкт є незначними.

Колівання частинок хвилі характеризується періодом - час, протягом якого тіло (частинка хвилі) здійснить одне повне коливання. Оскільки за період хвиля поширюється на відстань, яка дорівнює її довжині, то існує зв'язок між швидкість поширення хвилі (v), її довжиною (λ) та періодом (частотою) (f):

$$v = f \times \lambda \quad (1.1)$$

Напр. видиме світло має довжину хвилі від 390 до 770 нм, радіохвилі від ≈ 1 м до декількох км (табл. 1). Випромінювання мобільного телефону з частотою 450-2200 МГц має довжину хвилі 0.14-0.67 м, мікрохвильова (надвисокочастотна) піч з частотою хвиль 2.4 ГГц має довжину хвилі 12.5 см.

Таблиця 1.1.

Шкала електромагнітних хвиль		
Довжина, м	Частота, Гц	Найменування
$10^6 - 10^4$	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^4$	Наддовгі
$10^4 - 10^3$	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	Довгі
$10^3 - 10^2$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	Середні
$10^2 - 10^1$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	Короткі
$10^1 - 10^{-1}$	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^9$	Ультракороткі
$10^{-1} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$	Телебачення
$10^{-2} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	Радіолокація
$10^{-3} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{14}$	Інфрачервоні
$10^{-6} - 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$	Світло, яке ми бачимо
$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$	Ультрафіолетові
$10^{-9} - 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$	Рентгенівські
$10^{-12} - 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{22}$	Гамма-випромінювання
$\leq 10^{-14}$	$\Rightarrow 3 \cdot 10^{22}$	Космічні

Якщо виходити з того, що швидкість поширення хвилі дорівнює швидкості світла у вакуумі (c), рівняння (1) матиме такий вигляд:

$$c = f \times \lambda \quad (1.2)$$

Завдання 1.1. Яка довжина хвилі низькочастотного електромагнітного випромінювання з частотою 50 Гц?

З формули (1.2) отримуємо:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$$

Завдання 1.1. Розрахувати довжину хвилі при таких частотах:

Показник	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1λ, Гц	101	67	2100	1050	450	2800	5100	205	619	720
1λ, Гц	205	170	1070	190	2150	890	780	2070	760	910
1λ, Гц	400	210	70	300	250	30	4200	11000	550	110
1λ, Гц	1500	4100	3900	8000	9900	5400	8800	90	2550	60
1λ, Гц	350	9900	110	2500	700	1700	300	450	250	4000

Завдання 1.2. Побудувати графік залежності довжини хвилі від частоти.

1.2. Фотон.

Фотон – це елементарна частинка (квант світла), яка згідно гіпотези М. Планка є найменшою порцією енергії, з яких складається електромагнітне випромінювання. Фотон має енергію але не має маси і рухається з швидкістю світла.

Енергія фотона (E) відповідно до гіпотези М. Планка залежить від частоти і може бути виражена рівнянням:

$$E = h \times f \quad (1.3)$$

де h – стала Планка (у системі СІ $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Дж·с.), f – частота, Гц. Оскільки у системі СІ h дуже велике число, для розрахунків зручніше використовувати значення зведеної сталої Планка, виражене через електрон-вольти: $h = 6,58 \times 10^{-16}$ еВ·с. Для порівняння 1 Дж - це енергія, яку необхідно затратити для того щоб підняти тіло масою 1 кг до висоти 1 дм (10 см), або підвищити температуру 1 децилітра (100 см³) води на 0,002 °С.

Завдання 1.3. Для того, щоб око людини змогло зареєструвати світло, достатньо такої його кількості, яка дорівнює 10^{-18} Дж. Якій кількості фотонів відповідає дана кількість світла при довжині хвилі 600 нм.

Згідно формули 1.2 частота хвилі (f) становитиме:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

Згідно формули 1.3 енергія фотона (E) даної частоти становитиме:

$$E = h \times f = 6,63 \cdot 10^{-34} \times 5 \cdot 10^{14} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Отже, число фотонів становитиме:

$$\frac{10^{-18}}{3,3 \cdot 10^{-19}} = 3 \text{ фотони}$$

Завдання 1.4. Визначити кількість фотонів при такій довжині хвиль (λ):

Показник	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 λ , нм	750	670	400	570	590	710	440	550	620	720
1 λ , нм	1000	280	350	1200	6400	2100	1020	2080	6300	7700
1 λ , нм	710	620	540	709	650	630	480	590	530	590
1 λ , нм	0,20	90	0,45	310	2170	8300	3920	3090	3090	9050
1 λ , нм	1200	50	20	950	1250	2400	8430	4560	8300	7250

1.3. Електрон-вольт.

Електрон-вольт – це одиниця енергії, яка не входить до одиниць енергії, прийнятих у СІ, але є зручною одиницею в атомній та ядерній фізиці.

Енергію один електрон-вольт (еВ) набуває один електрон при проходженні через електростатичний бар'єр з потенціалом один вольт.

Таким чином, енергія, яка необхідна для перенесення заряду (T) є добутком енергії електрона (e) при проходженні його через електростатичний бар'єр з потенціалом (U):

$$T = e \times U \quad (1.4)$$

При заряді електрона $1,603 \cdot 10^{-19}$ Кл (кулон) і різниці потенціалів 1 В (вольт) його прискорення становитиме:

$$T = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ К} \times 1 \text{ В} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Дана енергія приймається за 1еВ, тобто: $1 \text{ еВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Завдання 1.5. В акселераторі що використовується у променевої терапії електрон прискорюється при різниці потенціалів 8 МеВ (мегаелектрон-вольт, $1 \text{ МеВ} = 1\,000\,000 \text{ В}$). Якої енергії (еВ) набуде електрон? Якою буде ця енергія для протона по відношенню до α -частинки яка прискорюється при такій же різниці потенціалів? Наскільки великою є енергія фотона $3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ у завданні 1.3. в електрон-вольтах?

Для електрона енергія згідно формули 1.4 становитиме:

$$T = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \times 8 \cdot 10^6 \text{ В} = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$$

тобто:

$$U = \frac{1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/еВ}} = 8 \cdot 10^6 \text{ еВ}$$

У випадку електрона енергія у еВ чисельно рівна різниці потенціалів у В.

Заряд протона чисельно рівний заряду електрона, отже енергія протона буде такою ж, тобто 8×10^6 еВ. α -частинки, які містять 2 протони, матимуть заряд вдвічі більший, тобто:

$$T = 2 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \times 8 \cdot 10^6 \text{ В} = 2,56 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = 16 \cdot 10^6 \text{ еВ}$$

З точки зору практики зручно використовувати префікси (кілоелектрон-вольт, $1 \text{ кеВ} = 1\,000 \text{ еВ}$) та (мегаелектрон-вольт, $1 \text{ МеВ} = 1\,000\,000 \text{ еВ}$). Отже енергія α -частинки становитиме 16 МеВ .

Оскільки $1 \text{ еВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$, енергія фотона становитиме:

$$\frac{3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/еВ}} = 2,1 \text{ еВ}$$

Завдання 1.5. Визначити енергію прискорення електрона, протона та α -частинки при такій різниці потенціалів, U, МеВ:

Показник	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, МеВ	7,5	6,7	4,4	5,7	5,9	7,1	4,7	5,5	6,2	7,2
U, МеВ	9,0	5,4	3,7	5,9	4,2	6,0	3,8	6,1	6,9	2,9
U, МеВ	84,0	105,0	83,2	11,4	37,1	18,0	77,2	26,9	45,1	44,8
U, МеВ	17,0	0,3	11,9	0,5	17,0	23,4	1,1	15,6	22,0	14,7

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Яке випромінювання називається електромагнітним?
2. Чим визначається швидкість поширення електромагнітних хвиль?
3. Який зв'язок існує між швидкістю поширення хвилі, її довжиною та періодом (частотою)?

Тема 2. Радіоактивний розпад та випромінювання.

Кількість речовини в системі СІ визначається у молях: 1 моль — це кількість речовини, що містить стільки структурних одиниць/ часток (атоми, молекули або йони) скільки їх (атомів) міститься у 0,012 кг ^{12}C . Така кількість відповідає числу Авогадро N_A ($6,02 \times 10^{23}$). Отже ^{12}C має молярну масу 12 г/моль.

Для подання мас мікрочастинок (атомів, атомних ядер та елементарних часток) використовується атомна одиниця маси (а.о.м.). Англомовний термін - *atomic mass unit* (u). 1 а.о.м. (u) = 1/12 маси ізотопу ^{12}C , тобто маса атома ізотопу ^{12}C = 12. 000 000 а.о.м.

Оскільки ізотоп ^{12}C має 12 нуклонів у ядрі, маса кожного нуклона становитиме ≈ 1 u. В дійсності маса нейтрона (m_n) дещо більша маси протона (m_p):

$$\begin{aligned} m_p &= 1,007\,276\text{ u} \\ m_n &= 1,008\,665\text{ u} \end{aligned}$$

Отже, сума 6 протонів і 6 нейтронів є вищою 12 u, тобто маси атома ^{12}C . Різниця між сумою мас протонів і нейтронів та масою атомного ядра називається *дефектом маси* – це енергія зв'язку атомного ядра. Оскільки 1 моль атомів ^{12}C має масу 12 г, а 1 атом має масу 12 u, можна розрахувати яка маса (кг) відповідає 1 u:

$$E = 1,6605 \cdot 10^{-27} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2 = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

Маса електрона становить $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, а співвідношення між масами протона та електрона становить $\approx 1\,800$, тобто протон \approx у 2 000 разів важчий електрона.

Розмір атомного ядра можна визначити із співвідношення:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (2.1)$$

де: R – радіус ядра атома; A – маса ядра атома; $R_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-15}$ м.

З рівняння 2.1 можна визначити щільність ядра атома.

Об'єм (V) ядра атома можна знайти з рівняння 2.2:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A \quad (2.2)$$

тобто об'єм ядра атома прямо пропорційний числу нуклонів. Отже, всі ядра атомів мають приблизно однакову щільність, оскільки величина маси прямо пропорційна масовому числу. Отже, щільність матеріалу ядра атома становитиме:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3 \quad (2.3)$$

Для підрахунку кількості енергії яка відповідає 1 u використаємо рівняння 2.4:

$$E = mC^2 \quad (2.4)$$

де $m = 1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$:

$$E = 1,6605 \cdot 10^{-27} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2 = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

або у еВ:

$$E = \frac{1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/еВ}} = 931,5 \text{ MeV}$$

Маса ядра атома ізотопу водню – дейтерію ${}^2\text{H}$ становить 2.013 553 u, тоді як сума мас протона та нейтрона становитиме:

$$1,007\,276 \text{ u} + 1,008\,665 \text{ u} = 2,015\,941 \text{ u},$$

отже, різниця становитиме:

$$2,015\,941 - 2,013\,553 = 0,002\,388 \text{ u}$$

або 2,2 MeV¹.

Це енергія зв'язку нуклонів у ядрі атома. Оскільки ${}^2\text{H}$ містить два нуклони, питома енергія зв'язку для одного нуклона у випадку дейтерію буде 1,1 MeV.

Радіоактивність (A) може бути представлена як число перетворень/розпадів ядер нестійких ізотопів за одиницю часу:

$$A = \lambda \times N \quad (2.5)$$

де: λ - постійна радіоактивного розпаду, с⁻¹; N – число ядер атомів.

Математично експоненціальна крива радіоактивного розпаду може бути виражена так:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

де: N_0 – початкове число ядер атомів, т. то на час $t = 0$, N – залишкове число ядер атомів на час t.

Якщо A_0 – це активність на час $t = 0$, рівняння 2.5. можна записати у такому вигляді:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

1 2,2 MeV (931,5 MeV x 0,002388 u)

З рівняння 2.6. також можна вивести зв'язок між постійною розпаду та періодом напіврозпаду:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (2.8)$$

Тоді рівняння 2.5. можна переписати наступним чином:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \times N \quad (2.9)$$

Завдання 2.1. У тілі кожної людини міститься ≈ 2 г калію/кг маси тіла, з яких 0,012% - це радіоактивний ^{40}K , який забезпечує активність $\approx 61,43$ Бк. Яка сумарна активність 20 000 людей при середній масі тіла людини 70 кг.

Завдання 2.2. Зразок що містить радіонуклід ^{137}Cs має активність 4,0 МБк. Скільки атомів ^{137}Cs містить даний зразок?

^{137}Cs має період напіврозпаду ≈ 30 років. Оскільки активність – це число перетворень (розпадів) ядер за одиницю часу, у сек., період напіврозпаду становитиме $\approx 9,46 \cdot 10^8$ сек. Виконавши перетворення у формулі 2.9 отримаємо:

$$N = \frac{T_{1/2}}{0,693} \times A = \frac{9,46 \cdot 10^8}{0,693} \times 4,0 \cdot 10^6 = 5,5 \cdot 10^{15} \text{ шт}$$

Завдання 2.2.1. Скільки атомів містить зразок ^{90}Sr з періодом напіврозпаду ≈ 29 років при такій активності (А):

Показник	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А, МБк	1,1	4,7	2,1	1,5	4,6	2,3	5,2	2,6	6,3	7,5
А, МБк	0,10	67,3	88,4	99,5	12,8	34,6	45,1	0,90	11,3	33,9
А, МБк	0,01	0,19	0,02	0,18	24,1	15,6	0,05	0,09	0,15	1,7
А, МБк	12,3	7,8	4,0	10,1	3,2	4,8	2,4	4,7	1,9	4,2

Завдання 2.3. Період напіврозпаду радіонукліду $^{99\text{m}}\text{Tc}$ становить 6 годин. Скільки часу потрібно, щоб активність препарату зменшилась з 100 МБк до 100 кБк?

З рівняння 2.7 та 2.8 знайдемо, що:

$$A = A_0 \cdot e^{\frac{-0,693}{T_{1/2}} \cdot t} \Rightarrow \ln \frac{A}{A_0} = \frac{-0,693}{T_{1/2}} \cdot t \Rightarrow t = \frac{T_{1/2}}{0,693} \cdot \ln \frac{A_0}{A} = \frac{6}{0,693} \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^5} = 60 \text{ годин}$$

Отже, необхідно 10 періодів напіврозпаду, щоб вихідна активність даного радіонукліду зменшилась у 1 000 разів.

Завдання 2.3.1. Скільки часу потрібно для зменшення активності радіонукліду у 1 000 разів:

Показники	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Радіонуклід	^{24}Na	^{32}P	^{58}Co	^{59}Fe	^{64}Cu	^{131}I	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	^{133}Xe	^{90}Y	^{67}Ga
Період напіврозпаду ($T_{1/2}$), годин	15,05	14,2*	71,3*	45,1*	12,8	8,06	2,8	5,65	64,2	77,9
Вихідна активність (A), МБк	10,0	150,0	140,0	100,1	30,2	40,8	200,0	45,0	90,0	140,0

* дні

Завдання 2.3.2. Якою буде активність (в Бк та Кі) 1,0 г радію-226 (^{226}Ra) з періодом напіврозпаду 1600 років.

Спочатку визначимо число атомів радію-226 у 1,0 г препарату. Оскільки молярна маса становитиме 226 г/моль, число атомів становитиме:

$$N = \frac{m \times N_A}{M}$$

де m – маса препарату (1,0 г); M – молярна маса (г/моль); N_A – число Авогадро (кількість атомів у 1 молі речовини):

$$N = \frac{1,0 \times 6,02 \cdot 10^{23}}{226} = 2,6646 \cdot 10^{21} \text{ атомів}$$

Використовуючи рівняння 2.9 отримаємо:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \times N = \frac{(0,693) \times (2,6646 \cdot 10^{21})}{1600 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 3,66 \cdot 10^{10} \text{ Бк або } 0,989 \text{ Кі}$$

Завдання 2.3.3. Визначити активність (в Бк та Кі) радіонуклідів приведених у завданні 2.3.1. Маса препарату 1,0 г.

Завдання 2.4. Визначити активність (в Бк та Кі) джерела випромінювання, якщо відомо, що за 20 секунд відбувається 10^8 розпадів радіонуклідів.

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Чим зумовлено радіоактивне перетворення ядер атомів за α -розпаду?
2. У чому полягає механізм β -розпаду?
3. Що таке період напіврозпаду ядер? Що він характеризує?
4. У чому полягає суть закону радіоактивного розпаду?
5. Що таке активність радіонукліда? В яких одиницях вона вимірюється?

Тема 3. Оцінка іонізуючого випромінювання та дозових навантажень за даними радіоекологічного моніторингу.

Основні величини та одиниці, що використовуються в радіології, радіобіології та радіоекології та співвідношення між системними і позасистемними одиницями показано в табл. 1.3. Показником можливої радіаційної небезпеки гірських порід, ґрунтів, води, будівельних матеріалів, відходів, харчових продуктів є їхня активність, що визначається числом радіоактивних розпадів в одиницю часу (секунду). Одиницею виміру активності в системі СІ є *беккерель*, а позасистемній – *кюрі*.

Таблиця 1.3.

Фізичні величини та, їх одиниці виміру

Фізична величина	Одиниця, її назва та позначення (міжнародне, українське)		Співвідношення між одиницями	
	Позасистемна	СІ	Позасистемної і СІ	СІ і позасистемної
Активність нукліду в радіоактивному джерелі	Кюрі (Ci, Ки)	Беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк	1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки
Експозиційна доза	Рентген (R, Р)	Кулон на кілограм (C/kg, Кл/кг)	1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг	1 Кл/кг = 3876 Р
Потужність експозиційної дози	Рентген за секунду (R/s, Р/с)	Ампер на кілограм (A/kg, А/кг)	1 Р/с = $2,58 \cdot 10^{-4}$ А/кг	1 А/кг = 3876 Р/с
Поглинена доза	Рад (rad, рад)	Грэй (Gy, Гр)	1 рад = 0,01Гр	1 Гр = 100 рад
Інтенсивність поглиненої дози	Рад за секунду (rad/s, рад/с)	Грей за секунду (Gy/s, Гр/с)	1 рад/с = 0,01Гр/с	1 Гр/с = 100 рад/с
Еквівалентна доза	Бер(rem, бер)	Зіверт (Sv, Зв)	1 бер = 0,01Зв	1 Зв = 100 бер
Інтенсивність еквівалентної дози	Бер за секунду (rem/s, бер/с)	Зіверт за секунду (Sv/s, Зв/с)	1 бер/с = 0,01 Зв/с	1 Зв/с = 100 бер/с

Завдання 1. Обчисліть величину поглиненої дози іонізуючого випромінювання працівником за такими даними:

Варіант	Маса тіла, кг	Кількість енергії іонізуючого випромінювання, Дж
1	75; 82; 94	250; 314; 540
2	84; 60; 102	190; 308; 614
3	68; 77; 64	270; 555; 283
4	77; 92; 105	220; 750; 511
5	70; 61; 92	280; 330; 640
6	82; 63; 94	300; 209; 401
7	81; 110; 78	320; 510; 315
8	67; 77; 90	270; 310; 720
9	79; 84; 66	190; 430; 510
10	87; 99; 61	210; 711; 177

Завдання 2. Розрахуйте величину експозиційної дози ($D_{\text{експ}}$) при іонізації 1 кг сухого повітря при $t 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та тиску 760 мм.рт.ст. за такими даними:

Варіант	Електричний заряд, Кл
1	1,5; 2,7; 0,9
2	2,5; 1,8; 2,2
3	2,7; 0,7; 0,1
4	3,2; 3,9; 0,4
5	2,8; 1,1; 11,0
6	3,0; 1,5; 0,9
7	3,3; 0,4; 13,7
8	2,6; 0,7; 1,0
9	1,9; 11,7; 0,2
10	210; 0,02; 11,5

Завдання 3. Чому дорівнює еквівалентна доза (H) при таких значеннях:

Варіант	Поглинута доза, Гр	Значення радіаційних зважуючих факторів, W_R
1	5,0; 11,0; 0,3	1,0; 20,0; 5,0
2	3,0; 38,9; 0,11	5,0; 10,0; 20,0
3	5,9; 22,8; 1,7	10,0; 5,0; 20,0
4	3,9; 0,43; 34,1	20,0; 1,0; 5,0
5	10,1; 0,1; 22,7	20,0; 5,0; 10,0
6	3,8; 22,1; 0,15	10,0; 20,0; 5,0
7	4,6; 0,11; 23,1	1,0; 5,0; 10,0
8	3,4; 0,9; 0,01	5,0; 10,0; 20,0
9	6,2; 17,8; 0,2	10,0; 20,0; 1,0
10	7,1; 0,88; 0,01	5,0; 10,0; 20,0

Завдання 4. Чому дорівнює колективна еквівалентна доза ($D_{\text{кед}}$) при таких значеннях:

Варіант	Еквівалентна доза, Зв	Кількість осіб що зазнали опромінення	Вид випромінювання і діапазон енергії	Значення радіаційних зважувачих факторів, W_R
1	5,0	12; 48; 110	Фотони, всі енергії (у т.ч. γ -і рентг. випромін.)	1,0
2	3,0	8; 2; 78	Електрони (позитрони), всі енергії	1,0
3	5,9	14; 88; 19	Протони з енергією > 2 МеВ	5,0
4	3,9	200; 25; 14	Нейтрони з енергією < 10 кеВ	5,0
5	10,1	11; 23; 117	Нейтрони з енергією від 10 кеВ до 100 кеВ	10,0
6	3,8	19; 65; 11	Нейтрони з енергією від 100 кеВ до 2 МеВ	20,0
7	4,6	22; 9; 221	Нейтрони з енергією від 2 МеВ до 20 МеВ	10,0
8	3,4	150; 89; 56	Нейтрони з енергією > 20 МеВ	5,0
9	6,2	90; 121; 412	α -частки, уламки ділення, важкі ядра віддачі	20,0
10	7,1	7; 44; 219	α -частки, уламки ділення, важкі ядра віддачі	20,0

Завдання 5. Чому дорівнює ефективна еквівалентна доза (E) при таких значеннях:

Варіант	Орган, що опромінюється	Тканинний зважувачий коефіцієнт, W_T	Еквівалентна доза, бер
1	Гонади (статеві залози)	0,2	1050; 218; 10
2	Червоний кістковий мозок	0,12	550; 120; 980
3	Товстий кишківник	0,12	720; 370; 415

ЖДТУ	Міністерство освіти і науки України Житомирський державний технологічний університет
------	---

4	Шлунок	0,12	99; 910; 620
5	Легені	0,12	350; 718; 50
6	Сечовий міхур	0,05	400; 919; 12
7	Печінка	0,05	980; 230; 410
8	Стравохід	0,05	670; 340; 110
9	Щитоподібна залоза	0,05	330; 117; 1020
10	Шкіра	0,01	210; 11; 456

Завдання 6. Чому дорівнює потужність дози випромінювання при таких значеннях:

Варіант	Поглинена доза, Гр	Тривалість випромінювання, хв
1	50; 11; 210	15; 55; 100
2	30; 120; 87	25; 210; 48
3	59; 90; 310	127; 56; 110
4	39; 10; 400	32; 155; 44
5	101; 610; 90	128; 39; 49
6	38; 410; 710	130; 45; 16
7	46; 820; 110	33; 90; 111
8	34; 11, 1020	126; 78; 312
9	62; 39; 107	19; 180; 10
10	71; 230; 80	210; 77; 11

Завдання 7. Яку дозу отримає робітник за один робочий день при таких значеннях:

Варіант	Інтенсивність еквівалентної дози, мбер/год	Тривалість зміни, год
1	50; 78; 10	5,5
2	39; 210; 115	4,5
3	69; 89; 204	7,3
4	37; 120; 99	3,6
5	91; 12; 208	8,0
6	48; 17; 300	3,9
7	49; 95; 101	7,0
8	64; 102; 12	6,2
9	67; 11; 99	4,9
10	78; 1001; 14	4,5

Завдання 8. Розрахувати масову концентрацію радіонукліду в орному шарі ґрунту при таких значеннях:

Варіант	Щільність забруднення ^{137}Cs , ($\times 10^4$) Бк/м ²	Щільність ґрунту, г/см ³	Орний шар (глибина), см
1	5,0; 11,0; 111,2	1,40; 1,10; 1,50	20,0; 25,04 27,0
2	3,0; 0,9; 90,4	1,20; 0,85; 1,13	22,0; 24,0; 28,0
3	5,9; 8,8; 22,7	1,10; 0,90; 1,14	21,0; 18,0; 26,0
4	3,9; 10,1; 211,8	1,30; 1,17; 0,77	23,0; 27,0; 22,0
5	10,1; 0,2; 55,6	1,20; 1,34; 0,79	25,0; 27,0; 24,0
6	3,8; 11,7; 112,4	1,30; 0,65; 1,19	24,0; 22,0; 20,0
7	4,6; 59,0; 11,9	1,10; 1,14; 1,32	22,0; 18,0; 25,0

8	3,4; 23,4; 250,0	1,40; 0,98; 1,17	21,0; 24,0; 28,0
9	6,2; 11,8; 78,6	1,30; 1,23; 1,14	23,0; 20,0; 27,0
10	7,1; 90,7; 101,4	1,20; 1,44; 1,09	25,0; 21,0; 20,0

Завдання 9. Скільки становить ефективна еквівалентна доза при таких значеннях:

Варіант	Органи	Коефіцієнт радіаційного ризик	Значення еквівалентної дозы, Зв
1	Гонади (статеві залози)	0,2	12,0; 23,1; 19,1
2	Червоний кістковий мозок	0,12	5,8; 19,2; 0,77
3	Товстий кишківник	0,12	11,2; 0,84; 32,7
4	Шлунок	0,12	0,6; 1,14; 41,6
5	Легені	0,12	1,7; 2,99; 9,13
6	Сечовий міхур	0,05	10,5; 0,09; 12,7
7	Печінка	0,05	11,4; 63,2; 0,11
8	Стравохід	0,05	8,7; 25,17; 0,99
9	Щитоподібна залоза	0,05	6,3; 0,07; 14,5
10	Шкіра	0,01	4,1; 17,18; 0,63
11	Клітини кісткових поверхонь	0,01	10,0; 1,46; 0,58
12	Головний мозок	0,025	17,3; 53,8; 0,11
13	Решта тканин	0,05	11,9; 0,03; 0,55

Завдання 10. Розрахуйте потужність дози випромінювання при таких значеннях:

Варіант	Поглинена доза, Гр	Тривалість опромінення, хв
1	1,5	350; 216; 101
2	2,5	120; 10; 91
3	2,7	187; 77; 204
4	3,2	300; 43; 123
5	2,8	278; 56; 119
6	3,0	500; 12; 301
7	3,3	64; 77; 209
8	2,6	210; 99; 12
9	1,9	340; 102; 515
10	210	100; 90; 210
11	1,5	230; 15; 90
12	2,5	280; 203; 401
13	2,7	310; 15; 119

Завдання 11. Розрахувати щільність забруднення ґрунту радіонуклідом ^{137}Cs (Бк/м²) при таких значеннях*:

Варіант	Питома активність ^{137}Cs , Бк/кг с.в.	Розміри ґрунтового бура, мм	Вологість ґрунту, %
1	550; 334; 1020	150x57	25,3
2	1320; 23; 514	180x45	20,8
3	9559; 901; 15	100x30	28,0
4	960; 117; 501	150x60	25,6

5	1011; 34; 209	250x60	27,9
6	3800; 207; 113	100x50	15,1
7	4600; 745; 71	150x50	21,9
8	537; 90; 1020	180x45	27,2
9	763; 120; 1200	150x35	28,4
10	987; 67; 908	150x50	26,3

*Примітка: щільність ґрунту приведено у завданні 8.

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Що таке доза іонізуючого випромінювання?
2. Яку біологічну дію спричиняє іонізуюче випромінювання на організм людини?
3. Як можна захиститись від іонізуючих випромінювань?
4. Поясніть поняття «поглинена доза іонізуючого випромінювання»

Тема 4. Оцінка інтенсивності γ -випромінювання з допомогою дозиметра RDS-30

Дія приладу РДС-30 ґрунтується на використанні лічильника *Гейгера – Мюллера*. Даний прилад дозволяє вимірювати потужність γ - випромінювання з енергією 662 кеВ в діапазоні від 0,01 мкЗв/год до 100 мЗв/год. Діапазон величин вимірюваної дози від 0,01 мкЗв до 1 Зв. Прилад компактний, легкий, водонепроникний, високопродуктивний і добре підходить для обстеження радіаційної обстановки в польових умовах.



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд дозиметра RDS-30

Завдання 1. Підготувати прилад до роботи та виміряти потужність випромінювання на території університету на 5 дослідних майданчиках.

Дані вимірювань занести у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1.

Результати вимірювання потужності випромінювання.

Час вимірювання... .., місце вимірювання... ..

Вимірювання	Потужність γ -випромінювання, мкЗв/год
1	
2	
3	
4	
5	

6	
7	
8	

Завдання 2. Виконати статистичну оцінку отриманих даних g- випромінювання за таким зразком:

Дано ряд значень, мЗв/рік:

1,57; 1,60; 1,81; 1,60; 1,88; 1,79; 1,75; 1,85
1,92; 1,68; 1,75; 1,73; 1,72; 1,68; 1,76; 1,78

Сума значень:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1,57 + 1,60 + 1,81 + \dots + 1,78 = 27,87$$

Середнє значення $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{27,87}{16} = 1,741875$

Дане число можна заокруглити до 1,74 або 1,742.

Для розрахунку медіанного значення (M_e) розмістимо значення у зростаючому порядку:

1,57	1,60	1,60	1,68	1,68	1,72	1,73	1,75	1,75	1,76	1,78	1,79	1,81	1,85	1,88	1,92
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Оскільки маємо 16 спостережень (парне число), медіана $M_e = \frac{16+1}{2} = 8,5$ Отже, середнє значення 8 та 9 і буде медіана – 1,75.

Дисперсія

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} = \frac{48,6955 - \frac{27,87^2}{16}}{15} = 0,009963.$$

Де

$$\sum x_i^2 = 1,57^2 + 1,60^2 + \dots + 1,76^2 + 1,78^2 = 2,4649 + 2,5600 + \dots + 3,0976 + 3,1784 = 48,6955.$$

Стандартне (середнє квадратичне) відхилення $s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,009963} = 0,099814.$

Заокруглено $s = 0,1.$

Стандартне відхилення краще інтерпретувати, оскільки розмірність цього показника така ж, як і даних, що аналізуються.

Коефіцієнт варіації:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{0,099814}{1,7419} = 0,057303.$$

Або 5,7%.

Стандартна похибка середнього значення $m = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,099814}{\sqrt{16}} = 0,02495 = 0,025.$

Розмір стандартної похибки середнього значення обернено пропорційний квадратному кореню з розміру вибірки.

Завдання 4. Зробити висновки за результатами розрахунків.

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Який принцип роботи детектора радіоактивного випромінювання на основі іонізаційної камери - лічильник *Гейгера-Мюллера*?
2. Які Ви знаєте одиниці потужності γ -випромінювання?
3. Як розрахувати медіанне значення потужності еквівалентної дози?

Тема 5. Основи розрахунків загальної ефективної дози опромінення.

5.1. Загальна ефективна доза опромінення (E), отримана фізичною особою, як правило, визначається шляхом додавання наступних компонентів; доза зовнішнього опромінення (E_{ext}), доза при вдиханні (інгаляційна доза) (E_{inh}), та доза що формується за рахунок споживання продуктів харчування і води (E_{ing}):

$$E = E_{\text{ext}} + E_{\text{inh}} + E_{\text{ing}} \quad (1)$$

Величину дози зовнішнього опромінення (E_{ext}) можна розрахувати виходячи із значення амбієнтного (Зв/год) опромінення: величину потужності дози у повітрі слід помножити на кількість годин, проведених при таких умовах:

$$E_{\text{ext}} = (\text{доза навк. середовища в Зв/год}) \times (\text{кількість годин}) \quad (2)$$

Величину інгаляційної дози (E_{inh}) розраховують у два етапи. По-перше, слід помножити величину питомої активності радіонукліду в повітрі ($\text{Бк}/\text{м}^3$) на величину обсягів повітря що вдихається людиною (м^3). В результаті отримаємо кількість «радіоактивності що вдихається», Бк. По-друге, знайдену величину слід помножити на відповідний коефіцієнт (Зв/Бк), який відповідає віковій групі людей. Коефіцієнти перерахунку, які використовуються при розрахунках взяті з JOCE². Орієнтовні значення коефіцієнтів для перерахунку максимальної очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення при інгаляційному надходженні радіонуклідів приведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Орієнтовні значення коефіцієнтів для перерахунку максимальної очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення при інгаляційному надходженні радіонуклідів

Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк	Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк	Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк
²³³ U	0,037	^{242m} Am	0,067	²⁴⁷ Cm	0,066
²³⁵ U	0,033	²⁴³ Am	0,071	²⁴⁹ Cf	0,086
²³⁸ Pu	0,063	²³⁷ Np	0,078	²⁵¹ Cf	0,087
^{239,240} Pu	0,069	²⁴³ Cm	0,050	⁹⁰ Sr	$3,5 \times 10^{-4}$
²⁴¹ Pu	0,0013	²⁴⁴ Cm	0,040	¹³¹ I	$8,8 \times 10^{-5}$
²⁴¹ Am	0,071	²⁴⁵ Cm	0,073	¹³⁷ Cs	$6,6 \times 10^{-5}$

Інгаляційна доза для кожного радіонукліда розраховується за формулою:

$$E_{\text{inh}} = (\text{питома активність радіонукліду у повітрі (Бк}/\text{м}^3)) \times (\text{обсяг повітря що вдихається (м}^3)) \times (\text{віковий коефіцієнт перетворення (Зв/Бк)}) \quad (3)$$

2 *Journal Officiel des Communautés Européennes (JOCE)*, Council directive 96/29/Euratom of May 13, 1996, 1996L0029 – EN – 13.05.2000 – 000.001 – 2

Загальна ефективна доза від інгаляції є сумою E_{inh} від усіх радіонуклідів присутніх у повітрі.

Для точної оцінки ефективної дози шляхом інгаляції, необхідно знати які радіонукліди присутні в повітрі, відповідні значення їх концентрацій і коефіцієнти перетворення кожного з них.

Дані щодо питомої радіоактивності пилу повітря обмежені, але можна скористатись даними потужності дози. Середній об'єм повітря, що вдихається дорослою людиною протягом доби для розрахунків прийнято у кількості 12 м^3 (14 м^3 для чоловіків і 10 м^3 для жінок).

Доза, що формується за рахунок споживання забруднених продуктів харчування і води (E_{ing}). Очевидно, що цю величину оцінити найважче, оскільки споживачі не поінформовані про точні рівні забруднення кожного продукту харчування що споживаються. Радіонукліди що надійшли в організм людини також виводяться з нього шляхом природного метаболізму протягом певного періоду часу (біологічний напіврозпад) при одночасному зниженні радіоактивності за рахунок фізичного напіврозпаду.

Ці процеси враховуються шляхом використання коефіцієнтів для переходу від величини поглиненої дози до величини ефективної дози. Величини цих коефіцієнтів варіюють залежно від радіоактивних елементів, а також віку людини.

Значення їх також беруться з JOSE, як зазначено вище.

Орієнтовні значення коефіцієнтів для перерахунку максимальної очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення при пероральному надходженні радіонуклідів приведені у табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Орієнтовні значення коефіцієнтів для перерахунку максимальної очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення при пероральному надходженні радіонуклідів

Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк	Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк	Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мЗв/Бк
^{233}U	$5,0 \times 10^{-5}$	^{242m}Am	$5,5 \times 10^{-4}$	^{247}Cm	$5,4 \times 10^{-4}$
^{235}U	$4,0 \times 10^{-5}$	^{243}Am	$5,8 \times 10^{-4}$	^{249}Cf	$7,0 \times 10^{-4}$
^{238}Pu	$8,8 \times 10^{-4}$	^{237}Np	$6,4 \times 10^{-4}$	^{251}Cf	$7,1 \times 10^{-4}$
$^{239,240}\text{Pu}$	$9,7 \times 10^{-4}$	^{243}Cm	$4,0 \times 10^{-4}$	^{90}Sr	$2,7 \times 10^{-5}$
^{241}Pu	$1,9 \times 10^{-4}$	^{244}Cm	$3,3 \times 10^{-4}$	^{131}I	$1,2 \times 10^{-4}$
^{241}Am	$5,8 \times 10^{-4}$	^{245}Cm	$5,9 \times 10^{-4}$	^{137}Cs	$1,9 \times 10^{-5}$

Ефективна доза за рахунок споживання забруднених продуктів харчування (E_{ing}) розраховується за формулою:

$$E_{ing} = (\text{рівень радіоактивного забруднення їжі (Бк/кг)}) \times (\text{кількість забрудненої їжі що споживається (кг)}) \times (\text{віковий коефіцієнт (Зв/Бк)}) \quad (4)$$

Даний розрахунок повинен бути виконаний для кожного із забруднених продуктів (продукти та напої/рідини).

5.2. Приклад спрощеного розрахунку.

5.2.1. Потужність дози зовнішнього опромінення (E_{ext}), мкЗв/год множимо на 24 години, як показано в рівнянні (2):

$$E_{ext} = (0,06 \text{ мкЗв/год}) \times 24 \text{ години} = 0,144 \text{ мкЗв/добу.}$$

5.2.2. Прийmemo, що питома активність ^{134}Cs , ^{137}Cs та ^{131}I (якщо він присутній) у повітрі виміряна у той же день становить 10 мБк/м^3 для кожного ізотопу.

$$10 \text{ мБк/м}^3 = 0,01 \text{ Бк/м}^3.$$

Використовуємо значення дозових коефіцієнтів $0,07 \text{ мкЗв/Бк}$ для ^{134}Cs та ^{137}Cs та $0,09 \text{ мкЗв/Бк}$ для ^{131}I (табл. 5.1, спрощений варіант рівняння 3):

$$E_{inh} (\text{Cs}) = (0,01 \text{ Бк/м}^3) \times (0,07 \text{ мкЗв/Бк}) \times 2 \text{ (для } ^{134}\text{Cs і } ^{137}\text{Cs)} = 0,0014 \text{ мкЗв.}$$

$$E_{inh} (\text{I}) = (0,01 \text{ Бк/м}^3) \times (0,09 \text{ мкЗв/Бк}) = 0,0009 \text{ мкЗв.}$$

$$E_{inh} (\text{всього}) = 0,0023 \text{ мкЗв.}$$

5.2.3. Маса (в кг) забруднених (за ^{134}Cs і ^{137}Cs) харчових продуктів що споживаються і їх рівні забруднення (в Бк/кг) (рівняння 4 з коефіцієнтом $0,02 \text{ (мкЗв/Бк}^*$, табл. 5.2) для отримання ефективної дози в мкЗв. Для дітей до 10 років, результат множиться на 1,5 і для дітей до 1 року - на 3.

Приклад: 1 кг овочів з рівнем забруднення 100 Бк/кг (за ^{134}Cs і ^{137}Cs у поєднанні):

$$E_{ing} = (100 \text{ Бк/кг}) \times 0,02 \text{ (мкЗв/Бк)} = 2 \text{ мкЗв}$$

Результати розрахунків у 5.2.1., 5.2.2. та 5.2.3. додаються для отримання загальної ефективної дози, отриманої в цей день, тобто $\sim 2,15 \text{ мкЗв}$.

* Примітка: в дійсності коефіцієнти для Cs-134 та Cs-137 становлять 19 та 13 нЗв/Бк відповідно. З метою спрощення розрахунків та деякої переоцінки величини дози значення коефіцієнта для обох радіонуклідів приймаємо рівним $0,02 \text{ мкЗв/Бк}$.

5.3. Приклад детальнішого розрахунку.

20-річний чоловік (або жінка) проживають у населеному пункті що розташований на території забрудненій радіонуклідами на віддалі 200 км від джерела забруднення (аварія на АЕС 11 березня 2011 року) і не використовують будь-яких обмежувальних заходів та заходів захисту щодо впливу радіоактивності та радіоактивних матеріалів. Перебуваючи 24 години на добу у даному населеному пункті, людина споживає їжу і рідини, які забруднені радіоактивними ізотопами цезію до рівня 500 Бк/кг для продуктів харчування і 200 Бк/кг для рідин (напоїв). Яку дозу опромінення отримує чоловік/жінка протягом двох місяців (напр. з квітня по травень 2011 року) за таких умов?

5.3.1. Зовнішнє опромінення.

Середні величини потужності зовнішнього опромінення приблизно становили 0,075-0,080 мкЗв/год (квітень) та 0,065-0,070 мкЗв/год (травень). При середніх значеннях 0,08 і 0,07 мкЗв/год (E_{ext}) становитиме:

$$E_{ext} (\text{квітень} + \text{травень}) = 0,08 \text{ мкЗв/год} \times (24 \text{ год/день}) \times (30 \text{ днів}) + 0,07 \text{ мкЗв/год} \times (24 \text{ год/день}) \times (31 \text{ днів}) = 110 \text{ мкЗв}$$

5.3.2. Інгаляційне надходження. У атмосферному повітрі були виявлені такі γ -випромінюючі радіонукліди: Cs (134, 136 і 137), Te (129, 132 і 129m), I (131 і 132), La (140), Tc (99m) і Ba (140). Середні значення концентрації радіонуклідів виявлених протягом квітня і травня 2015 року (мБк/м³), період напіврозпаду ($T =$ годин, $d =$ днів, $p =$ років) і коефіцієнти перерахунку (cf, нЗв/Бк) приведені у таблиці 5.3. Значення CF беруться з того ж джерела (ЮСЕ) для вікової групи 17 років і вище.

Найбільші значення факторів (найбільш шкідливі для людського організму) є ¹³¹I, ¹³⁴Cs і ¹³⁷Cs.

Таблиця 5.3

Концентрація радіонуклідів в повітрі населеного пункту*

Показники	¹⁴⁰ Ba	¹³⁴ Cs	¹³⁶ Cs	¹³⁷ Cs	¹³¹ I	¹³² I	¹⁴⁰ La	^{99m} Tc	¹²⁹ Te	^{129m} Te	Одиниці
кв		s									
Квітень	0,01	8,01	0,24	7,32	6,22	0,06	0,18	0,27	1,23	2,41	мБк/м ³
Травень	<0,001	3,44	0,04	3,99	0,70	-	0,02	-	0,33	0,73	мБк/м ³
$T_{1/2}$	13д	2р	13д	30р	8д	2,3г	2д	6г	1г	34д	
CF*	1,0	6,6	1,2	4,6	7,4	0,09	0,6	0,3	0,02	1,3	нЗв/Бк

*Оскільки концентрація радіонуклідів у повітрі значно коливається, середні значення концентрації приведені тут мають швидше математичний ніж фізичний зміст.

Як видно з таблиці у квітні переважали ізотопи цезію та йоду, тоді як у травні концентрація всіх радіонуклідів зменшилась, як за рахунок дифузії (напр., перенесення вітром) так і за рахунок природного розпаду. У травні основний вклад у величину дози опромінення забезпечували переважно ізотопи цезію.

Кількість радіоактивності що накопичується в тілі і ефективна доза може бути оцінена використовуючи рівняння (3).

Для ¹³⁷Cs:

$$\begin{aligned} \text{Концентрація у квітні} &= (7,32 \text{ мБк/м}^3) \times (12 \text{ м}^3/\text{день}) \times (30 \text{ днів}) \times (4,6 \text{ нЗв/Бк}) = 12,12 \text{ нЗв} \\ \text{Концентрація у травні} &= (3,99 \text{ мБк/м}^3) \times (12 \text{ м}^3/\text{день}) \times (31 \text{ днів}) \times (4,6 \text{ нЗв/Бк}) = 6,83 \text{ нЗв.} \end{aligned}$$

Всього за два місяці: 18,94 нЗв (12,12 + 6,83) за рахунок ¹³⁷Cs.

Такі ж розрахунки необхідно провести для всіх інших радіонуклідів, щоб отримати величину ефективної дози при інгаляційному надходженні радіонуклідів.

Сукупна ефективна доза при інгаляційному надходженні за два місяці становитиме:

$$49 \text{ нЗв у квітні (з яких 63\% від } ^{134}\text{Cs і } ^{137}\text{Cs та 33\% від } ^{131}\text{I) і}$$

$$18 \text{ нЗв у травні (з яких 86\% від } ^{134}\text{Cs і } ^{137}\text{Cs та 11\% від } ^{131}\text{I)}$$

$$\text{Всього} = 67 \text{ нЗв.}$$

Для маленьких дітей величину дози слід помножити на 3-5; діти вдихають меншу кількість повітря, але перевідний коефіцієнт для дітей віком до 2 років є на порядок вищим.

5.3.3. Пероральне надходження.

Як згадувалося раніше, оцінити величину надходження радіоактивного матеріалу всередину (в основному в результаті споживання їжі) надзвичайно складно.

Тому, будемо вважати, що кожний харчовий продукт (рідина чи інші продукти харчування) максимально забруднені: 500 Бк/кг для харчових продуктів та 200 Бк/кг для рідин.

Припустимо, що доросла людина споживає такі (свіжі) продукти протягом одного тижня:

- Рис 1,5 кг
- Морепродукти 1 кг
- М'ясо 1 кг
- Листові овочі 0,5 кг
- Інші овочі 1,5 кг
- Соеві продукти 0,5 кг
- Молочні продукти 0,5 кг
- Молоко 1 л
- Вода (у тому числі кава і т.д.) 10 л

У списку перелічено 6,5 кг продуктів харчування (всі містять 500 Бк/кг радіоактивності) і 11 літрів рідини (200 Бк/кг). Для спрощення, щільність молока приймається 1 кг/л. Листові чаї не враховуються, оскільки вони споживаються в дуже малих кількостях.

Враховуючи низьку активність інших (крім цезію) ізотопів та короткий період напіврозпаду ^{131}I обмежимося розрахунком вкладу тільки Cs (134 і 137) у загальну дозу опромінення. Коефіцієнти перерахунку для продуктів харчування та рідин приймаємо 19 нЗв/Бк як для ^{134}Cs так і для ^{137}Cs (табл.. 5.2.).

Підставивши значення у рівняння (4), отримаємо:

$$E_{\text{ing}} (\text{продуктів харчування}) = (6,5 \text{ кг}) \times (500 \text{ Бк/кг}) \times (19 \text{ нЗв/Бк}) = 62 \text{ мкЗв}$$

$$E_{\text{ing}} (\text{рідин}) = (11 \text{ кг}) \times (200 \text{ Бк/кг}) \times (19 \text{ нЗв/Бк}) = 42 \text{ мкЗв.}$$

Отже, людина протягом тижня, споживаючи забруднені продукти харчування та напої, отримує ~ 100 (62+42) мкЗв дози опромінення.

Якщо людина буде споживати ті ж продукти протягом двох місяців (квітень і травень), загальна доза опромінення при пероральному надходженні радіонуклідів складе ≈ 870 ($104 \times 8,4$) мкЗв. Це значення \approx у 8 разів більше дози, отриманої за рахунок зовнішнього опромінення і \approx у 1000 разів більше дози від інгаляційного надходження.

Варто зазначити, що приведені рівні опромінення сильно переоцінені, оскільки радіоактивне забруднення продуктів харчування та напоїв за ^{137}Cs у рази, а то і на порядок нижчі значень допустимих рівнів (1); частина продукції може надходити з «чистих» територій (2). Враховуючи ці та інші фактори, приведені величини доз з метою більш реалістичної оцінки можуть бути зменшені щонайменше вдвічі.

Тобто:

43 мкЗв/тиждень замість 62 мкЗв/тиждень з продуктами харчування

і

2 мкЗв/тиждень замість 42 мкЗв/тиждень з рідинами.

Загальна розрахункова доза = 45 мкЗв/тиждень.

Отже, доросла людина, що проживає на віддалі 200 км від джерела забруднення і споживає дуже забруднену їжу та воду може отримати 0,5 мЗв дози опромінення від γ -випромінюючих радіонуклідів за два місяці (квітень і травень 2011 року). Найбільше радіонуклідів (майже 80%) надходить до організму людини через споживання сильно забруднених продуктів харчування. Якщо людина продовжує жити і харчуватися в той же спосіб, він/вона може отримати 3,0 мЗв за рік (з квітня 2011 року по березень 2012 року). Ці значення повинні бути додані до середньорічної дози опромінення від джерел, не пов'язаних з аварією, зокрема 3,8 мЗв (1,5 мЗв від природних джерел і 2,3 мЗв від техногенних джерел). Загальна доза опромінення становитиме $\approx 7,0$ мЗв. Без вкладу інгаляційного надходження (E_{ing}), доза випромінювання в той же 12 місячний період буде $\approx 4,5$ мЗв. Тобто, якщо виключити довготривале вживання сильно забруднених продуктів харчування, ймовірність отримання високих доз опромінення є низькою, за умови, що людина не перебуває значну частину часу в сильно забрудненій зоні (поблизу електростанції).

5.4. Завдання.

Розрахувати загальну ефективну дозу опромінення, яку отримає людина при таких вихідних даних:

Варіант	Вік, років	Забруднення радіоактивними ізотопами цезію (134 та 137) продуктів харчування, Бк/кг	Забруднення радіоактивними ізотопами цезію рідин, Бк/кг	Середні величини потужності зовнішнього опромінення у квітні, мкЗв/год	Середні величини потужності зовнішнього опромінення у травні, мкЗв/год
1	25	200	100	0,095-0,108	0,060-0,070
2	42	180	80	0,060-0,080	0,050-0,060
3	39	450	200	0,055-0,070	0,045-0,060
4	55	600	160	0,040-0,050	0,035-0,040

ЖДТУ	Міністерство освіти і науки України Житомирський державний технологічний університет				
------	---	--	--	--	--

5	33	300	80	0,075-0,080	0,055-0,070
6	38	250	120	0,090-0,105	0,080-0,090
7	41	400	70	0,075-0,095	0,060-0,080

Інші вихідні дані наведені у прикладах розрахунків. Префікси і числові позначення використовуваних величин приведені у додатку 2.

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Що таке доза іонізуючого випромінювання?
2. Які одиниці радіоактивності й дози випромінювання Ви знаєте?
3. Які існують підходи до визначення дози іонізуючого випромінювання?

Тема 6. Вимоги до обробки результатів вимірювань.

6.1. Значуща цифра.

В результаті прямих або *непрямих* вимірювань отримуються *наближені* значення - числа, які несуттєво відрізняється від точного (вірного) числа і замінюють останнє при обчисленнях.

Значущими цифрами наближеного числа називаються всі цифри в його десятковому відображенні, відмінні від нуля, та нулі, якщо вони є між значущими цифрами або розміщені в кінці числа і вказують на збереження розряду точності. Нулі, що стоять лівіше першої відмінної від нуля цифри, не є значущими цифрами. *Вірними* цифрами числа є ті які заслуговують «довіри». Наприклад, якщо при вимірюванні лінії з точністю до 1 м виходить результат 285,41 м, вірними будуть цифри 285, останні дві цифри невірні, «не заслуговують довіри»

Наприклад (значущі цифри підкреслені):

4,570345; 0,007614; 0,03105600; 3750000; 3,75·10⁶.

Найбільша *значуща* цифра – це крайня ліва, що не дорівнює 0, незважаючи на те, де знаходиться десяткова кома:

123 0,0215

Найменша *значуща* цифра – це крайня права, що не дорівнює 0, цифра, якщо десяткова кома відсутня:

4537 5300

Найменша *значуща* цифра – це крайня права цифра, яка може дорівнювати 0 або ні, якщо є десяткова кома:

21,34 1,260

Усі цифри між найбільшою та найменшою значущими цифрами є також значущими.

Наприклад (значущі цифри підкреслені):

123; 12300; 12,3; 1,23; 0,123; 0,0123; 0,00123; 20,32; 4056; 0,06671; 1,260; 7,654 · 10⁴.

6.1.1. Контрольне завдання. Визначити кількість значущих цифр:

1*	0,012	12,34	1234	12,0	0,001	100
2	10,01	22,04	45390	201,2	0,606	1500
3	90,04	22,090	34908	121,01	0,00543	84,00
4	0,0105	61,984	870409	131,04	9,098	23,07
5	0,000090	102,0	4,539	510,46	22,04	4,0
6	0,00013	189,02	473,9	91,0	0,078	5,00
7	0,01967	1024,40	403,9	67,014	0,690	400

8	0,01090	34,77	390,09	191,02	0,341	400
---	---------	-------	--------	--------	-------	-----

* Варіанти

6.2. Округлення результатів при множенні та діленні наближених чисел.

Правило: при множенні та діленні наближених чисел у результаті потрібно залишити стільки значущих цифр, скільки їх є у числі з найменшою кількістю значущих цифр.

Приклади:

$$12,3 \cdot 1,22 = 15,006 \approx 15,0$$

$$1,2345 \cdot 0,0123 = 0,0151843 \approx 0,0152$$

6.2.1. Контрольне завдання. Округлити результати при множенні та діленні:

1*	$3,1416 \cdot 0,0123 =$	$129,6 \cdot 5,33 =$	$1,45 \cdot 0,17 =$	$21,22/1,23 =$	$6,060/2,09 =$
2	$8,19 \cdot 0,012 =$	$1299,68 \cdot 1,53 =$	$11,48 \cdot 0,09 =$	$43,22/2,13 =$	$6,052/3,101 =$
3	$3,2309 \cdot 0,123 =$	$1,8 \cdot 2,88 =$	$121,44 \cdot 0,13 =$	$41,12/3,103 =$	$6,009/3,17 =$
4	$3,1416 \cdot 0,0102 =$	$129,6 \cdot 2,13 =$	$1,45 \cdot 0,177 =$	$21,22/4,120 =$	$6,0606/2,1 =$
5	$3,987 \cdot 0,01 =$	$1,9 \cdot 15,03 =$	$87,56 \cdot 0,197 =$	$211,2/3,023 =$	$3,04/1,15 =$
6	$3,741 \cdot 0,0114 =$	$0,66 \cdot 5,005 =$	$3,65 \cdot 2,34 =$	$31,01/5,106 =$	$5,044/2,14 =$
7	$3,101 \cdot 0,123 =$	$90,61 \cdot 5,504 =$	$3,45 \cdot 1,23 =$	$0,202/0,123 =$	$7,003/3,19 =$
8	$3,8440 \cdot 0,0012 =$	$0,708 \cdot 5,59 =$	$10,45 \cdot 0,77 =$	$103,1/7,013 =$	$6,004/2,11 =$

* Варіанти

6.3. Округлення результатів при додаванні та відніманні наближених чисел.

Правило: при додаванні та відніманні наближених чисел результат округлюють так, щоб він не мав значущих цифр у тих найменших розрядах, які відсутні хоча б в одному доданку.

Приклади:

$$12,34 + 0,123 + 12,3 = 24,763 \approx 24,8$$

$$1,234 - 1,1 = 0,134 \approx 0,1$$

6.3.1. Контрольне завдання. Округлити результати при додаванні та відніманні:

1*	$3,1416 + 0,0123 =$	$129,6 + 5,53 =$	$1,45 + 0,77 =$	$21,22 - 8,123 =$	$6,0606 - 1,11 =$
2	$8,19 + 0,0123 =$	$1299,68 + 5,53 =$	$11,48 + 0,77 =$	$43,22 - 11,12 =$	$6,0512 - 4,1 =$
3	$3,2309 + 0,0123 =$	$1,8 + 5,53 =$	$121,454 + 0,77 =$	$41,12 - 9,123 =$	$6,009 - 3,10 =$
4	$3,1416 + 0,0123 =$	$129,6 + 5,53 =$	$1,45 + 0,77 =$	$21,22 - 5,123 =$	$6,0606 - 4,1 =$
5	$3,987 + 0,0123 =$	$1,9 + 5,53 =$	$87,56 + 0,77 =$	$211,2 - 23,123 =$	$3,04 - 2,11 =$
6	$3,741 + 0,0123 =$	$0,66 + 5,53 =$	$3,65 + 0,77 =$	$31,01 - 15,123 =$	$5,0404 - 4,11 =$
7	$3,101 + 0,0123 =$	$90,61 + 5,53 =$	$3,45 + 0,77 =$	$0,202 - 0,123 =$	$7,0033 - 1,99 =$
8	$3,8440 + 0,0123 =$	$0,708 + 5,53 =$	$10,45 + 0,77 =$	$103,12 - 59,123 =$	$6,004 - 4,11 =$

* Варіанти

6.4. Округлення результатів при піднесенні до степеня чи добуванні кореня.

Правило: у результаті слід залишати стільки значущих цифр, скільки їх є у вихідному числі, з яким відбувається дія.

Приклади:

$$2,3^3 = 12,167 \approx 12.$$

$$\sqrt[2]{25} = 5,0$$

6.4.1. Контрольне завдання. Округлити результати при піднесенні до степеня чи добуванні кореня:

1*	$3,14^2 =$	$(1,29 \cdot 10^{-4})^2 =$	$\sqrt[2]{55}$
2	$8,19^2 =$	$(2,04 \cdot 10^{-3})^3 =$	$\sqrt{55}$
3	$9,2^2 =$	$(5,16 \cdot 10^{-4})^2 =$	$\sqrt[2]{5}$
4	$3,1^4 =$	$(9,37 \cdot 10^{-4})^2 =$	$\sqrt[2]{25}$
5	$12,9^2 =$	$(2,29 \cdot 10^{-3})^3 =$	$\sqrt[2]{75}$
6	$3,7^3 =$	$(1,19 \cdot 10^{-4})^2 =$	$\sqrt[3]{90}$
7	$7,1^3 =$	$(5,88 \cdot 10^{-3})^3 =$	$\sqrt[2]{175}$
8	$3,8^5 =$	$(1,37 \cdot 10^{-3})^2 =$	$\sqrt[3]{100}$

* Варіанти

6.5. Похибки при прямих вимірюваннях.

Результати вимірювань можна розглядати як статистичну сукупність чисел.

Окрім одиниці, що входять до складу статистичної сукупності, називають варіантами.

Середнє арифметичне $\langle x \rangle$ є результатом ділення суми всіх варіант сукупності на їх загальне число n :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.1)$$

Випадкове відхилення δ (гр. дельта, дельта) від середнього арифметичного результату окремого спостереження дорівнює різниці між i -тим варіантом та середнім арифметичним:

$$\delta_i = x_i - \bar{x} \quad (6.2)$$

Дисперсія / варіація – сума квадратів відхилень віднесена до $n - 1$ визначається за формулою:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1} \quad (6.3)$$

Розмірність дисперсії дорівнює квадрату ознаки що вимірюється, що незручно при розрахунках.

Тому для вимірювання розсіювання/варіації використовують характеристику *середнє квадратичне відхилення* δ

$$\delta^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}} \quad (6.4)$$

δ дорівнює кореню квадратному від дисперсії і має розмірність величини що варіює.

Вибіркова похибка середнього арифметичного m (похибка репрезентативності) визначається за формулою:

$$m = \frac{\delta}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\delta^2}{n}} \quad (6.5)$$

Підставляючи значення з δ рівняння (6.4) у рівняння (6.5), отримаємо:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}} \quad (6.6)$$

Довірча границя випадкової похибки, $\varepsilon(P)$ середнього арифметичного визначається так:

$$\varepsilon(P) = tm = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}} \quad (6.7)$$

де t – коефіцієнт Стьюдента (критерій надійності), який знаходять з табл. 1 (додатку) за даними кількості вимірів n та довірчою ймовірністю P .

Довірча границя систематичної похибки Δ_c (складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини) визначається ціною поділки C вимірювального приладу. Ймовірність того, що $c \leq C$, $c(P) = 1$.

Довірча границя сумарної похибки (Δ) дорівнює:

$$\Delta = \varepsilon(P) + \Delta_c \quad (6.8)$$

Відносна похибка (ε): відношення довірчої границі сумарної похибки (Δ) до середнього арифметичного ($\langle x \rangle$):

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\bar{x}} \quad (6.9)$$

Приклад.

Результати вимірювання потужності дози γ -випромінювання (мкР/год) в повітрі становить:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
мкР/год	25,0	36,4	19,9	22,1	31,2	28,0	25,5	29,3	30,8	24,9

Визначити відносну похибку вимірювань потужності дози γ -випромінювання.

Розв'язання.

Визначаємо середнє арифметичне:

$$x = (25,0 + 36,4 + 19,9 + 22,1 + 31,2 + 28,0 + 25,5 + 29,3 + 30,8 + 24,9) / 10 = 27,3 \text{ мкР/год.}$$

Випадкові відхилення при вимірюванні потужності дози γ -випромінювання становлять:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= |25,0 - 27,3| = 2,3 \text{ мкР/год}; & \delta_6 &= |28,0 - 27,3| = 0,7 \text{ мкР/год}; \\ \delta_2 &= |36,4 - 27,3| = 9,1 \text{ мкР/год}; & \delta_7 &= |25,5 - 27,3| = 1,8 \text{ мкР/год}; \\ \delta_3 &= |19,9 - 27,3| = 7,4 \text{ мкР/год}; & \delta_8 &= |29,3 - 27,3| = 2,0 \text{ мкР/год}; \\ \delta_4 &= |22,1 - 27,3| = 5,2 \text{ мкР/год}; & \delta_9 &= |30,8 - 27,3| = 3,5 \text{ мкР/год}; \\ \delta_5 &= |31,2 - 27,3| = 3,9 \text{ мкР/год}; & \delta_{10} &= |24,9 - 27,3| = 2,4 \text{ мкР/год}. \end{aligned}$$

Дисперсія для сукупності вимірювань дорівнює:

$$\delta^2 = (2,3^2 + 9,1^2 + 7,4^2 + 5,2^2 + 3,9^2 + 0,7^2 + 1,8^2 + 2,0^2 + 3,5^2 + 2,4^2) / 9 = 23,4 \text{ мкР/год.}$$

Похибка репрезентативності становитиме:

$$m = \sqrt{\frac{23,4}{10 \cdot 9}} = 0,51 \frac{\text{мкР}}{\text{год}}.$$

Коефіцієнт Стьюдента (t) для нашого прикладу становить 2,23 для n = 10 і P = 0,95.

Довірча границя випадкової похибки $\epsilon(P)$ становитиме:

$$2,23 \times 0,51 \text{ мкР/год} = 1,14 \text{ мкР/год.}$$

Приймемо, що вимірювання потужності дози γ -випромінювання проведено з точністю до 0,3 мкР/год, тобто довірча границя систематичної похибки (Δ_s) становить $s = 0,3$ мкР/год.

Тоді довірча границя сумарної похибки (Δ) з урахуванням правил округлення дорівнюватиме:

$$1,14 + 0,3 = 1,44 \text{ мкР/год.}$$

Відносна похибка (ε , %) при визначенні потужності дози γ -випромінювання дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{1,44}{27,3} = 0,053 = 5,3$$

6.5.1. Контрольне завдання. Виконати обробку результатів вимірювань потужності дози γ -випромінювання (мкР/год) в повітрі:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	18,6	19,4	22,0	17,3	24,9	23,2	18,5	22,1	17,8	26,1	24,2	22,9
2	39,6	44,3	42,1	35,4	34,1	37,3	47,6	29,3	34,7	35,8	54,3	32,8
3	10,3	14,1	12,9	11,5	20,3	13,5	14,6	20,2	11,7	16,8	14,1	12,8
4	39,7	28,1	29,9	37,5	35,0	30,1	38,4	32,5	37,0	36,9	34,3	33,3
5	67,3	69,1	73,7	71,4	64,4	73,5	68,4	72,7	87,8	75,1	54,3	61,8
6	88,2	91,5	82,4	77,2	84,2	73,1	78,6	62,3	77,9	86,5	64,3	88,7
7	13,5	28,4	21,1	18,6	35,8	31,3	16,5	20,2	27,4	21,3	29,5	20,2

Питання для самоконтролю та обговорення.

1. Які цифри називають значущими?
2. Як округлюються результати при додаванні та відніманні наближених чисел?
3. Як округлюються результати при піднесенні до степеня чи добуванні кореня?
4. Як вирахувати дисперсію/варіацію?

Література.

1. Посудін Ю. І. Моніторинг довкілля з основами метрології: підручник. – К.: 2012. – 426 с.
2. *Journal Officiel des Communautés Européenes (JOCE)*, Council directive 96/29/Euratom of May 13, 1996, 1996L0029 — EN — 13.05.2000 — 000.001 — 2
3. Mats Isaksson. Grundläggande strålningsfysik. 2011. Studentlitteratur Ab, Lund, 330 s.
4. S. Nakamae, “Radiation Risk after Fukushima: Know and reduce your risk using available data,” RadioProtection Cirkus, la portail de la radio protection pratique et opérationnelle, <http://www.rpcirkus.org/> [2011].
5. 8. ICRP Publication № 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients.- Oxford: Pergamon, 1993.-166 p. (Публікація МКРЗ № 67, Вік-залежні дози осіб з населення від надходження радіонуклідів. Частина 2. Дозові коефіцієнти для надходження).
6. 9. ICRP Publication № 69. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients.- Oxford: Pergamon, 1995.-74 p. (Публікація МКРЗ № 69, Вік-залежні дози осіб з населення від надходження радіонуклідів. Частина 3. Дозові коефіцієнти для надходження).
7. 10. ICRP Publication № 71. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients.- Oxford: Pergamon, 1995.-405 p. (Публікація МКРЗ № 71, Вік-залежні дози осіб з населення від надходження радіонуклідів. Частина 4. Дозові коефіцієнти для інгаляції).

Додатки

Додаток 1

Значення критерію t (розподіл Ст'юдента) в залежності від імовірності P і числа ступенів вільності k

k	$p=0,90$	$p=0,95$	$p=0,99$
1	6,310	12,71	63,7
2	2,920	4,30	9,92
3	2,350	3,18	5,84
4	2,130	2,77	4,60
5	2,020	2,57	4,03
6	1,943	2,45	3,71
7	1,895	2,36	3,50
8	1,860	2,31	3,36
9	1,833	2,26	3,25
10	1,812	2,23	3,17
11	1,796	2,20	3,11
12	1,782	2,18	3,06
13	1,771	2,16	3,01
14	1,761	2,14	2,98
15	1,753	2,13	2,95
16	1,746	2,12	2,92
17	1,740	2,11	2,90
18	1,734	2,10	2,86
19	1,729	2,09	2,86
20	1,725	2,08	2,84
22	1,717	2,07	2,82
24	1,711	2,06	2,80
26	1,706	2,06	2,78
28	1,701	2,05	2,76
30	1,697	2,04	2,75
40	1,684	2,02	2,70
60	1,671	2,00	2,66
120	1,658	1,98	2,62
	1,645	1,96	2,58

Додаток 2

Короткий перелік СІ (міжнародні стандарти) префіксів і числових позначень.

1 Бк = 1 000 мБк = 1 000 000 мкБк = 1 000 000 000 нБк,

1 000 Бк = 10^3 Бк = 1 кБк,

0,001 Бк = 10^{-3} Бк = 1 мБк,

0,000001 Бк = 10^{-6} Бк = 1 мкБк,

0,000000001 Бк = 10^{-9} Бк = 1 нБк

Множники та префікси для утворення кратних та частинних одиниць

Префікси СІ							
кратні				частинні			
Множник	Назва	Позначення		Множник	Назва	Позначення	
		українське	міжнародне			українське	міжнародне
10^1	(дека)	да	da	10^{-1}	(деци)	д	d
10^2	(гекто)	г	h	10^{-2}	(санти)	с	c
10^3	кіло	к	k	10^{-3}	мілі	м	m
10^6	мега	М	M	10^{-6}	мікро	мк	μ
10^9	гіга	Г	G	10^{-9}	нано	н	n
10^{12}	тера	Т	T	10^{-12}	піко	п	p
10^{15}	пета	П	P	10^{-15}	фемто	ф	f
10^{18}	екса	Е	E	10^{-18}	ато	а	a
10^{21}	зета	З	Z	10^{-21}	зепто	з	z
10^{24}	йота	Й	Y	10^{-24}	йокто	й	y