

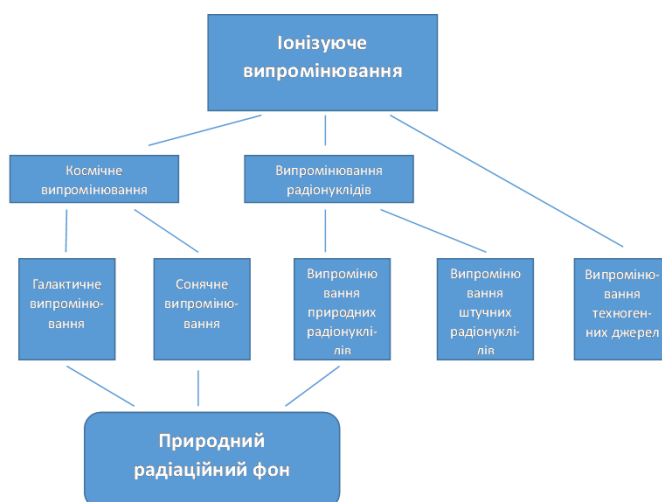
Загальні принципи медичних дій у випадку радіаційної/ ядерної надзвичайної ситуації

МОДУЛЬ 2. Джерела радіоактивності на Землі та як радіація впливає на живі організми

ЛЕКЦІЯ 3.

Джерела іонізуючих випромінювань на Землі. Космічне випромінювання. Випромінювання природних радіонуклідів. Космогенні радіонукліди. Штучні радіонукліди. Радіонукліди, що утворюються ядерними реакторами. Радіонукліди атомних вибухів. Міжнародна шкала ядерних подій INES (International Nuclear Energy Scale). Техногенні аварії на об'єктах атомної енергетики у 20-21 ст. Радіонукліди, що утворюються в при ядерних та термоядерних вибухах. Хронологія ядерної детонації. Зони руйнувань та зони радіаційного забруднення. Зони радіоактивних випадів

ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ЗЕМЛІ



Космічне випромінювання

Космічне випромінювання складається з галактичного та сонячного. У ньому виділяють також первинне та вторинне випромінювання.

Первинне космічне випромінювання

являє собою потік частинок високих енергій, що надходять на Землю з міжзоряного простору. Воно складається переважно з протонів – ядер водню (приблизно 90%) та електронів (біля 1%).



Космічне випромінювання

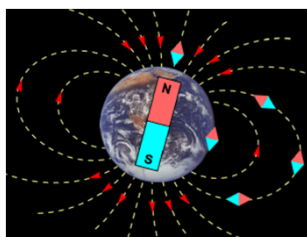
Вторинне космічне випромінювання виникає як результат взаємодії високо енергетичного первинного випромінювання з ядрами нуклідів, що входять до складу атмосфери. Воно складається практично з усіх відомих на теперішній час елементарних частинок – протонів, електронів, нейтронів, фотонів, піонів, мюонів, мезонів та багатьох інших. Їх енергія також достатньо висока для того, щоб індукувати подальші ядерні перетворення.

Космічне випромінювання

Впливу космічного випромінювання зазнає вся поверхня Землі. Однак це опромінення нерівномірне.

Інтенсивність космічного випромінювання залежить від:

- сонячної активності
- географічного положення
- висоти над рівнем моря



5

Космічне випромінювання

Космічне випромінювання має велику інтенсивність в основному за межами земної атмосфери. На висоті приблизно 40–50 км переважає первинне космічне випромінювання.

Максимальна інтенсивність вторинного випромінювання спостерігається на висоті 20–25 км.

Із зменшенням висоти його інтенсивність падає і досягає мінімуму на рівні моря. Тому цілком природно, що доза опромінення за рахунок космічного випромінювання зростає з висотою над рівнем моря.

6

Космічне випромінювання

Біля поверхні Землі потужність дози, що формується за рахунок космічного випромінювання, складає 0,02–0,04 мкЗв/год.

В межах до 10 км через кожні 1,5 км потужність дози космічного випромінювання висоти приблизно подвоюється. Відповідно, жителі гірських поселень, розташованих на висоті 2–5 км, зазнають впливу випромінювання приблизно у 5–10 разів більшій дозі. На висоті 10–12 км, що відповідає трасам сучасних висотних літаків, потужність дози досягає 2–5 мкЗв/год. На висоті 20 км, де здійснюють польоти надзвукові літаки, вона, залежно від геомагнітної широти місцевості, змінюється в межах 5–15 мкЗв/год.

7

Потужність радіаційного фону у залі очікування аеропорту Київ-Бориспіль і через декілька годин в літаку на висоті 10 км, мкЗв/год (фото В.О. Кашпарова).



8

Джерела радіонуклідів на Землі



Радіоактивні родини

Радіоактивною родиною (радіоактивним рядом) називають таку послідовність взаємопов'язаних радіоактивних атомів, в якій кожний наступний атом утворюється в результаті альфа або бета розпаду попереднього атома.

Наприклад, поступово розпадаючись, атоми торію-232 утворюють наступний радіоактивний ряд.

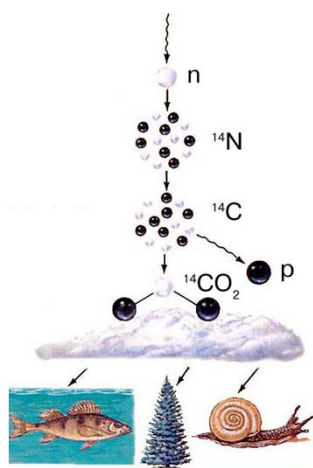
$^{232}\text{Th} - \alpha \rightarrow ^{228}\text{Ra} \text{ (} T = 13,9 \cdot 10^9 \text{ років)}$
 $^{228}\text{Ra} - \beta \rightarrow ^{228}\text{Ac} \text{ (} T = 6,7 \text{ років)}$
 $^{228}\text{Ac} - \beta \rightarrow ^{228}\text{Th} \text{ (} T = 6,13 \text{ годин)}$
 $^{228}\text{Th} - \alpha \rightarrow ^{224}\text{Ra} \text{ (} T = 1,9 \text{ років)}$
 $^{224}\text{Ra} - \alpha \rightarrow ^{220}\text{Rn} \text{ (} T = 3,64 \text{ доби)}$
 $^{220}\text{Rn} - \alpha \rightarrow ^{216}\text{Po} \text{ (} T = 51,4 \text{ с)}$
 $^{216}\text{Po} - \alpha \rightarrow ^{212}\text{Pb} \text{ (} T = 0,158 \text{ с)}$
 $^{212}\text{Pb} - \beta \rightarrow ^{212}\text{Bi} \text{ (} T = 10,6 \text{ годин)}$
 $^{212}\text{Bi} - \beta \rightarrow ^{212}\text{Po} \text{ (} T = 60,5 \text{ хвилин)}$
 $^{212}\text{Po} - \alpha \rightarrow ^{208}\text{Pb} \text{ (} T = 3 \cdot 10^{-7} \text{ с)}$
 ^{208}Pb – стабільний.

Характеристики випромінювань окремих природних радіонуклідів, що не утворюють родини

Радіонуклід	T 1/2, роки	Випромінювання	Енергія, МеВ
• 40K	$1,28 \times 10^9$	β, γ	1,325; 1,459
• 48Ca	1×10^{16}	β	0,077
• 96Zr	$6,2 \times 10^{16}$	β	3,400
• 115In	6×10^{14}	β	0,630
• 130Te	$1,4 \times 10^{21}$	β	0,226
• 138La	7×10^{10}	γ	0,535
• 147Sm	$1,05 \times 10^{11}$	α	4,500
• 150Nd	5×10^{10}	β	0,011
• 176Lu	$2,4 \times 10^{10}$	β, γ	0,215; 0,180
• 180W	$2,2 \times 10^{17}$	β, γ	0,4–3,2

11

Космогенні радіонукліди



Під впливом космічного випромінювання в атмосфері утворюються радіоактивні ядра («космогенні радіонукліди»):
при опроміненні космічним нейтроном ядра ізотопу азот-14 утворюється радіоактивний ізотоп водню – тритій



та радіоактивний вуглець-14



12

**Характеристики випромінювань деяких космогенних
радіонуклідів, що утворюються в атмосфері
під впливом космічної радіації**

Радіонуклід	T $\frac{1}{2}$	Випромінювання	Енергія, МеВ
^3H	12,34 роки	β	0,019
^{10}Be	$2,4 \times 10^6$ років	β	0,555
^{14}C	5730 років	β	0,155
^{22}Na	2,6 роки	β^+	0,545
^{26}Al	$7,4 \times 10^5$ років	β^+	1,165
^{28}Mg	21,2 год.	β	0,460
^{32}Si	700 років	β	0,210
^{32}P	14,3 доби	β	1,710
^{35}S	87,1 доби	β	0,167
^{36}Cl	$4,4 \times 10^5$ років	β	0,714
^{39}Ar	270 років	β	0,565

13

**Деякі радіоактивні ізотопи, що були присутні на Землі з
самого початку її створення**

№ з/п	Радіоактивний ізотоп	Період напіврозпаду, рік	Тип розпаду (вид випромінювання)
1	Уран-238	$4,5 \times 10^9$	Альфа-розпад
2	Торій-232	$1,4 \times 10^{10}$	Альфа-розпад, гамма-розпад
3	Калій-40	$1,3 \times 10^9$	Бета-розпад, гамма-розпад
5	Рубідій-87	$4,7 \times 10^{10}$	Бета-розпад
6	Індій-115	6×10^{14}	Бета-розпад
8	Самарій-147	12×10^{11}	Бета-розпад
9	Лютецій-176	$3,4 \times 10^{10}$	Бета-розпад, гамма-розпад

14

Природний радіаційний фон (ПРФ)

Природні джерела іонізуючих випромінювань утворюють на Землі відносно постійне радіаційне поле. Це і є так званий *природний радіаційний фон – рівень іонізуючого випромінювання на поверхні Землі, у приземному шарі атмосфери та інших об'єктах навколишнього середовища*, що формується за рахунок космічного випромінювання та випромінювання природних радіонуклідів. Це та природна радіаційна обстановка, у якій існувало й розвивалося усе живе на нашій планеті.

У різних регіонах Землі потужність природного радіаційного фону основному варіює в межах від 0,05 до 0,15 мкЗв/год., у середньому - 0,1 мкЗв/год., тобто приблизно 10 мкР/год. Внесок у нього космічного випромінювання, який дещо залежить від широти місцевості, на рівні моря більш-менш постійний – 0,01–0,03 мкЗв/год. Решта, яка визначається випромінюванням природних радіонуклідів, варіює у більш широких межах, так як залежить від їх вмісту у поверхневих шарах земної кори.

Кількість природних радіоактивних елементів в земній корі

Масова кількість природних радіоактивних елементів, як і радіоактивних ізотопів звичайних елементів, у земній корі, а, відповідно, у воді, рослинах, тваринах, дуже мала. Вміст у радію у ґрунтах складає $1\text{--}13 \times 10^{-11} \%$, урану – $2,6\text{--}4 \times 10^{-4} \%$, торію – $5\text{--}12 \times 10^{-4} \%$.

Невелика також кількість радіоактивних ізотопів стабільних елементів. Так, вміст у ґрунті ^{14}C варіює в межах $1\text{--}30 \times 10^{-9} \%$, ^{40}K – $1\text{--}5 \times 10^{-4} \%$. Вміст ^3H у воді складає приблизно $10^{-18} \%$ по відношенню до водню.

Опромінення від природних радіонуклідів

Зараз на Землі існує 23 довгоживучих радіоактивних елемента з періодами напіврозпаду більш ніж 10^7 років



уран-238,



торій-232,



калій-40,



ванадій-50

17

Природний радіаційний фон

Іонізуюче випромінювання від радіонуклідів земного походження

Середня ефективна доза зовнішнього опромінення, яку людина отримує за рік від радіонуклідів земного походження, становить близько 0,7 мЗв,

тобто кілька разів більше від середньої дози опромінення джерелами космічного походження на рівні моря.

18

Природний радіаційний фон

Найбільший внесок (біля $\frac{3}{4}$ річної дози) дають радон і продукти його розпаду.

Радон у 7,5 разів важчий за повітря



19

Опромінення за рахунок природних радіонуклідів

Ізотопи радону 222, 220 і 219 – це радіоактивні гази, що утворюються при розпаді ізотопів радію 226, 224 і 223, що є продуктами розпаду урану-238, торію-232 і урану-235, відповідно, і всі вони містяться в земній корі

Радон при розпаді випромінює альфа-частинки і утворює тверді продукти розпаду (полоній, вісмут, свинець тощо). які також є радіоактивними.

Потенційний вплив радону на здоров'я людини обумовлений продуктами цього розпаду, а не в самим газом. Незалежно від того, пов'язані вони з атмосферними аерозолями чи ні, продукти розпаду радону можуть вдихатися і, залежно від їх розміру, відкладатися в бронхо-легеневому дереві на різній глибині.

20

Опромінення за рахунок природних радіонуклідів

Концентрація радону в приміщенні залежить від концентрації радону в ґрунті, конструкції будівлі, обладнання (димохід, вентиляційні системи), параметрів навколишнього середовища в будівлі (температура, тиск тощо) та способу життя мешканців.

Для обмеження ризику для людей ВООЗ здоров'я рекомендує національний референтний рівень у 100 Бк/м³. Там, де це неможливо, референтний рівень не повинен перевищувати 300 Бк/м³. Ця рекомендація була схвалена державами-членами Європейського Співтовариства, які повинні встановити національні референтні рівні для концентрацій радону в приміщеннях. Референтні рівні для середньорічної концентрації активності в повітрі не повинні перевищувати 300 Бк/м³.

Для того, щоб зменшити ризик для всього населення, потрібно впроваджувати будівельні норми, які вимагають вжиття заходів з профілактики радону в будівлях, що будуються, та заходів з пом'якшення наслідків радону в існуючих будівлях.

21

Опромінення за рахунок природних радіонуклідів

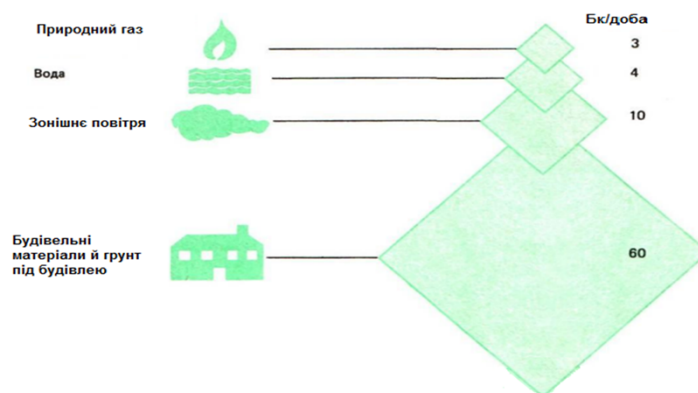
Концентрація радону може змінюватися у часі та просторі на кілька порядків. Опромінення радоном і продуктами його розпаду значно відрізняється в різних регіонах, оскільки залежить, по-перше, від кількості радону, що виділяється ґрунтом і будівельними матеріалами в кожній місцевості, і, по-друге, від ступеня ізоляції та погодних умов у місцях, де люди зазнають опромінення.

Оскільки радон має тенденцію концентруватися в закритих приміщеннях, зокрема, у будинках, основна частина опромінення населення пов'язана з радоном у приміщеннях. Ґрунтовий газ визнаний найважливішим джерелом радону в житлових приміщеннях через шляхи інфільтрації.

22

Опромінення за рахунок природних радіонуклідів

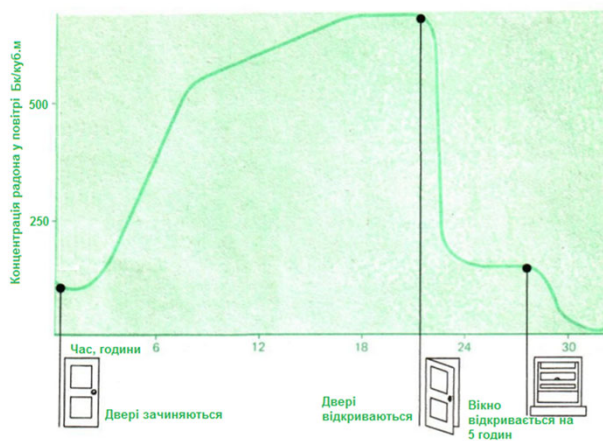
Джерела радону в типовому приміщенні



23

Природний радіаційний фон

У закритому приміщенні доза опромінення приблизно у 8 разів більша, ніж на свіжому повітрі



24

В організмі людини знаходяться такі радіонукліди природного походження:



- калій-40 ($T_{1/2}=1,4 \times 10^9$ років)
- рубідій-87 ($T_{1/2}=4,8 \times 10^{10}$ років)
- радон-220 ($T_{1/2}=54$ с) і радон-222 ($T_{1/2}=3,8$ с)
- радій-226 ($T_{1/2}=1600$ років)
- вуглець-14 ($T_{1/2}=5,7 \times 10^3$ років)

Внутрішнє опромінення від природних радіонуклідів



Середня доза від інкорпорованого в тілі ^{40}K становить приблизно 0,2 мЗв/рік. 1 банан - 0,1 мкЗв

Тіло людини містить приблизно 2 мг калію на 1 кг ваги, що приблизно еквівалентно питомій активності 60 Бк/кг.

Випромінювання штучних радіонуклідів

Штучні радіоактивні ізотопи утворюються під час ядерних реакцій, що відбуваються при вибухах атомної зброї і в ядерних реакторах і при бомбардуванні (опроміненні) ізотопів нерадіоактивних елементів частинками високих енергій від декількох мільйонів до десятків мільярдів електрон-вольт: α -частинками, нейтронами, протонами, зарядженими частинками на ядерних реакторах, прискорювачах легких частинок та важких іонів.

27

Характеристики випромінювань деяких штучних радіонуклідів

Радіонуклід	Період піврозпаду	Випромінювання	Енергія, MeV	
³² P	14,3 доби	β	1,710	
³⁵ S	87,1 доби	β	0,167	
⁴² K	12,36 год.	β		
⁴⁵ Ca	163 доби	β		
⁵⁴ Mn	312,3 доби	γ	0,830	
⁵⁹ Fe	45,1 доби	$\beta \gamma$	1,560	1,290
⁶⁰ Co	5,272 роки	$\beta \gamma$	1,478	1,330
⁹⁰ Sr	29 років	β	0,544	
⁹³ Zr	64,05 доби	$\beta \gamma$	0,890	0,756
⁹⁵ Nb	35,1 доби	β	0,160	
¹⁰⁶ Ru	368,2 доби	β	0,039	
¹³¹ I	8,04 доби	$\beta \gamma$	0,608	0,723
¹³⁴ Cs	2,06 роки	$\beta \gamma$	0,512	1,367
¹³⁷ Cs	30,17 роки	$\beta \gamma$	0,520	0,662
²³⁹ Pu	2,41×10 ⁴ років	α	5,580	
²⁴¹ Am	432,8 роки	α	5,570	

Радіонукліди ядерних реакторів

Ядерні енергетичні ядерні реактори(мобільні та стаціонарні) використовують ядерне паливо, до складу якого входять речовини, що мають властивість ділитися (уран U 235, плутоній Pu 239).

Прикладами ядерного пального є природний уран, двоокис урану UO₂, сплави урану із металами, двоокис плутонію PuO₂ тощо. Як ядерне паливо в сучасних ядерних реакторах використовують речовини, що містять у собі уран.

Уран досить широко розповсюджений у природі, але промислові уранові руди мають досить незначну кількісну концентрацію урану, що у середньому складає 0,1–0,5 %, а частіше і ще менше – 0,08–0,05 %.

Радіонукліди ядерних реакторів

У випадку зруйнування (аварії) ядерно-енергетичного реактора, на великих площах і значних відстанях від АЕС виникає довготривале радіоактивне забруднення місцевості. Радіоактивне забруднення місцевості у випадку зруйнування (аварії) на АЕС за складом радіоактивних речовин, площею забруднення, рівнями радіації на забрудненій місцевості та тривалістю її забруднення відрізняється від радіоактивного зараження місцевості у випадку ядерного вибуху.

За складом радіоактивних речовин, поряд із ізотопами урану, плутонію (як і під час ядерного вибуху) у місці аварійного викиду буде спостерігатися наявність короткоживучих радіоізотопів (йод I 131, телур Te132, цезій Cs 134, Cs 137), та газів (ксенон Xe 133, криптон Kr 85).

Радіонукліди ядерних реакторів

Уражаюча дія радіоактивного забруднення проявляється через внутрішнє і зовнішнє опромінення. Особливу небезпеку буде становити випадіння радіонуклідів (радіоактивний йод) із газоаерозольної хмари, упродовж якого незахищений персонал може отримати дозу внутрішнього опромінення від 400 до 3000 рад.

Міжнародна шкала ядерних подій INES (International Nuclear Energy Scale)

- Шкала:
- **0 рівень - Подія нижче шкали** Відсутня значущість з точки зору безпеки
- **1 рівень - Аномальна ситуація** Відхилення від дозволених меж функціонування реактора. Опромінення сторонньої особи понад річну дозу. Втрата, викрадення та доставка не за адресою низькоактивних джерел.
- **2 рівень – Інцидент** Подія з потенційними наслідками для безпеки. Знайдено беззахисне високоактивне джерело в належній упаковці. Порушення упаковки високоактивного джерела. Радіоактивність >50 мЗв/год у робочій зоні. Радіоактивне забруднення поширилося на зону, не встановлену проектом. Опромінення працівника понад річну дозу (≈3 мЗв); опромінення сторонньої особи* понад 10 мЗв
- **3 рівень - Серйозний інцидент** Аварії вдалося запобігти, але для цього довелося задіяти всі справні системи безпеки. Також: втрата, викрадення або доставка не за адресою високоактивного джерела. Радіоактивність >1 Зв/год у робочій зоні. Сильне радіоактивне забруднення в зоні, не передбаченій проектом, з низькою ймовірністю витoku назовні. Незначний викид: опромінення населення більше 10 річних доз. Видимі нелетальні ефекти (наприклад, опіки).

Міжнародна шкала ядерних подій INES (International Nuclear Energy Scale)

Шкала:

- 4 рівень - Аварія з локальними наслідками** Невеликий викид; опромінення населення в установлених межах дози; контрзаходи обмежуються контролем продуктів. Поодинокі смертельні випадки. Розплавлення або пошкодження паливних збірок з невеликим викидом. Викид значних кількостей радіоактивного матеріалу в межах установки, що робить ймовірним витік назовні.
- 5 рівень - Аварія з широкими наслідками** Обмежений викид; потрібне часткове здійснення планових заходів з відновлення. Важке пошкодження активної зони та фізичних бар'єрів. Викид великих кількостей радіоактивного матеріалу в межах установки, що може призвести до витоків назовні. Велика аварія з переходом на критичний режим або пожежею.
- 6 рівень - Серйозна аварія** Значний викид; потрібне повномасштабне здійснення планових заходів з відновлення (укриття, евакуація тощо).
- 7 рівень - Глобальна аварія** Сильний викид; важкі наслідки для здоров'я населення і для навколишнього середовища, можливо, навіть у сусідніх країнах.

33

МАГАТЕ (Міжнародна агенція з атомної енергетики) розробила спеціальну шкалу для оцінки масштабів радіаційних та ядерних аварій - Міжнародна шкала ядерних подій INES (International Nuclear Energy Scale).

МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ (INES)



Техногенні аварії на об'єктах атомної енергетики у 20-21 ст.

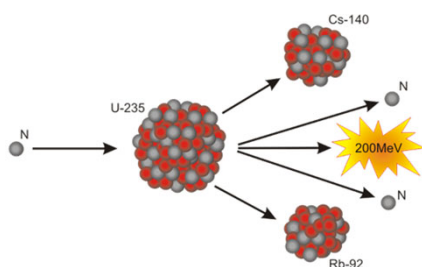
Під час Чорнобильської аварії у 1986 р., яка є найбільшою за всю історію розвитку ядерної енергетики і котра одержала статус глобальної катастрофи, на висоту до 7 км було викинуто за офіційною оцінкою 1986 р. більше $1,85 \times 10^{18}$ Бк суміші радіоактивних ізотопів у вигляді аерозолію.

За більш пізніми й точними оцінками у навколишнє середовище надійшло близько 1×10^{17} Бк ^{137}Cs (майже половина його вмісту в активній зоні реактору), приблизно 8×10^{15} Бк ^{90}Sr і більш як 1×10^{14} Бк трансуранових елементів – ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm .

Радіонуклідного забруднення з рівнем рівня вищим від 37 кБк/м² зазнала територія площею близько 200 тис. км² на межі України, Білорусі і Росії, на якій у той час проживало понад 6 мільйонів чоловік. Майже 360 тис. чоловік було евакуйовані з забруднених територій. Із землекористування було виведено понад 3000 км² площ.

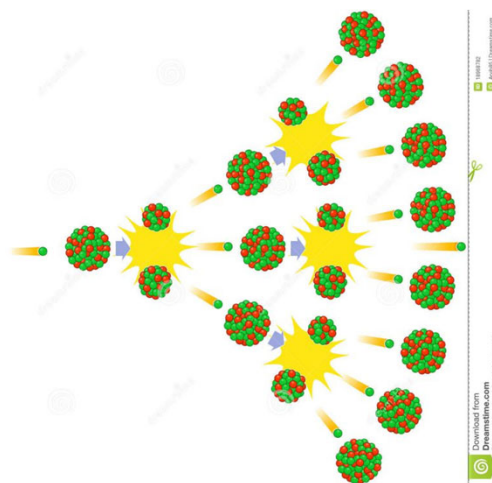
Радіонукліди атомних вибухів

Величезна кількість радіоактивних ізотопів виникає при вибухах атомних бомб, яких, починаючи з 1945 р., у світі було здійснено понад 2400 (543 наземних, 1876 підземних, 10 у космосі, деяка кількість підводних).



Якщо припустити, що у кожному поділі виникає тільки по два нейтрони, які приводять до поділу нових ядер, то через 80 поділів реакція, яка почалася з одного попадання, за мільйонні частки секунди призведе до розпаду усіх ядер у 1 кг ^{235}U (приблизно 10^{20} атомів). Цей процес супроводжується виділенням величезної кількості енергії.

Загальна схема ядерної реакції поділу та ланцюгової реакції поділу.



37

Не всі нейтрони, що виникають, викликають поділ ядер. Частина їх втрачається за межами об'ємної маси урану або плутонію. Якщо втрати дуже великі, то ланцюгова реакція розпочавшись зупиняється – затухає. Така імовірність тим вища, чим менша маса та лінійні розміри речовини.

Тому існує поняття *критичної маси* – найменша кількість речовини, що ділиться, при якій може протікати само підтримуюча ланцюгова реакція поділу атомних ядер. Саме вона визначає величину ядерного заряду в атомній бомбі чи іншому виді атомної зброї – це приблизно 20–25 кг чистого ^{235}U або 4–8 кг ^{239}Pu .

Природний уран являє собою суміш трьох ізотопів: ^{238}U , частка якого близько 99,3%, ^{235}U – приблизно 0,7% і ^{234}U – лише 0,006%.

Ланцюгова ядерна реакція може відбуватись у відносно чистому ^{235}U . Тому її здійснення передбачає одержання (збагачення) 40–60%-го ^{235}U на спеціальному досить складному і дорогому обладнанні. Це є однією з причин того, що на теперішній час атомною зброєю володіє відносно невелика кількість країн.

Що стосується ^{239}Pu , то плутоній – це взагалі штучний елемент, котрий одержують з ^{238}U . У природі він виявлений лише у надзвичайно мізерних кількостях в уранових рудах. Тому, ланцюгова ядерна реакція на Землі можлива тільки в штучних умовах.

Радіонукліди атомних вибухів

Ядерний вибух, що виникає в результаті штучного ділення розпаду в ході ланцюгової реакції урану-235, урану-238 і плутонію-239 є потужним джерелом іонізуючого випромінювання.

Під час ядерного (термоядерного) вибуху з'являється потужний потік іонізуючого випромінювання, що виникає безпосередньо в процесі розпаду й синтезу речовини, що складає заряд боєприпасів.

Під час ядерного і комбінованого вибухів в атмосфері на висоті менш ніж 30 км на частку енергії іонізуючих випромінювань припадає 15 % сумарної енергії вибуху. З них приблизно 5 % – проникаюча радіація (гамма-нейтронний потік), що діє в першу хвилину після вибуху, 10 % сумарної енергії ядерного вибуху припадає на випромінювання радіоактивного зараження, що виявляється протягом тривалого часу.

Радіонукліди атомних вибухів

Під час ядерної реакції поділу виникає декілька сотень різних радіоактивних ізотопів. В основному це атоми з масовими числами ядер в інтервалах 89–106 і 129–144. Серед них виділяють три групи штучних радіонуклідів.

Першу групу утворюють *радiонукліди, що виникають у реакціях поділу ядер ^{235}U і ^{239}Pu* . Основні з них – це ^{89}Sr і ^{90}Sr , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{103}Ru і ^{106}Ru , ^{129}I і ^{131}I , ^{134}Cs і ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce і ^{144}Ce .

41

Радіонукліди атомних вибухів

Другу групу формують *радiонукліди-продукти наведеної радіоактивації*, що виникають у результаті ядерних реакцій елементарних частинок (в основному нейтронів) з ядрами атомів стабільних елементів, що входять у склад конструктивних матеріалів корпусів боєголовок. Основні з них – ^{54}Mn , ^{55}Fe и ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn .

Третя група – *радiонукліди-ізотопи трансуранових елементів*, що виникають в результаті послідовних ядерних реакцій нейтронів і γ -випромінювання з ядрами атомів речовини, що ділиться, і наступного радіоактивного розпаду надважких ядер, що виникають при цьому. Радіонукліди цієї групи в основному α -випромінювачі – ^{237}Np , $^{238-241}\text{Pu}$, ^{241}Am і ^{243}Am , $^{242-244}\text{Cm}$, характеризуються високою радіотоксичністю і великими періодами піврозпадів

42

Радіонукліди атомних вибухів

- Переважаюча більшість штучних радіонуклідів, що утворюються при вибуху, короткоживучі і при випробуваннях бомб в атмосфері практично розпадаються, не досягнувши поверхні Землі. За наступні 1,5–2 роки розпадається і переважна більшість середньоживучих радіонуклідів. У радіоактивних випадіннях основне місце займають довгоживучі ізотопи ^{90}Sr і ^{137}Cs з періодами піврозпадів, відповідно, 29 і 30 років, а також трансуранові елементи.
- Загалом, за рахунок випробувань атомної зброї в біосферу надійшла величезна кількість довгоживучих радіонуклідів штучного походження: ^{239}Pu – $2,4 \times 10^{20}$ Бк (це значно більше, ніж його є у природі), ^{14}C – $2,2 \times 10^{17}$ Бк, ^{90}Sr – 6×10^{17} Бк, ^{95}Zr – $1,4 \times 10^{20}$ Бк, ^{106}Ru – $1,2 \times 10^{19}$ Бк, ^{137}Cs – $9,1 \times 10^{17}$, ^{144}Ce – 3×10^{19} Бк, ^{239}Pu – $6,5 \times 10^{15}$ Бк

43

Основні радіонукліди при атомному вибуху:

Продукти поділу: широкий спектр радіоактивних ізотопів, що утворюються в результаті розщеплення ядер урану або плутонію.

Матеріали зброї: плутоній-239, уран-235 та уран-238

Продукти активації: радіоактивні ізотопи, що утворюються в результаті опромінення нейтронами матеріалів навколишнього середовища.

Частка енергії іонізуючих випромінювань є невеликою частиною енергії, що вивільняється під час ядерного вибуху, однак унаслідок великої її проникаючої здатності, вона може діяти на значній відстані від джерела виникнення і навіть в укриттях.

Термоядерні реакції.

Ядерні реакції при яких легкі атомні ядра об'єднуються (синтезуються) у відповідні більш важкі ядра, називаються термоядерними реакціями, або реакціями термоядерного синтезу.

Вони називаються термоядерними тому, що відбуваються при надзвичайно високих температурах (понад 10^6K)

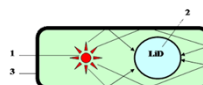
Оскільки ядерні сили є силами короткодійними, то для отримання енергії цих сил, взаємодіючі частинки потрібно зблизити на відстань радіусу дії ядерних сил ($\approx 1,5 \cdot 10^{-15}\text{м}$), тобто на відстань, яка в 10000 разів менша за діаметр атома.

Схема принципового устрою термоядерної бомби

В перших термоядерних бомбах, в якості термоядерної вибухівки використовували рідку суміш двох ізотопів водню: дейтерію ($2\text{D}1$) та тритію ($3\text{T}1$)

В сучасних термоядерних бомбах як основну вибухівку використовують тверду не радіоактивну речовину – дейтрид літію (LiD). Принцип дії цієї вибухівки полягає в наступному.

При підриві атомної бомби, термоядерна вибухівка (LiD) нагрівається до десятків мільйонів кельвінів. При цьому в ній відбувається величезна кількість термоядерних реакцій, які і спричиняють надпотужний вибух.



Основні реакції при термоядерному вибуху

- $6\text{Li} + n \rightarrow \text{He} + 3\text{T} + 4,8\text{MeV}$
- $2\text{D} + 3\text{T} \rightarrow 4\text{He} + n + 17,6\text{MeV}$
- $6\text{Li} + 2\text{D} \rightarrow 4\text{He} + 22,4\text{MeV}$
- $2\text{D} + 2\text{D} \rightarrow 3\text{T} + 1\text{H} + 4,0\text{MeV}$.

47

Термоядерний вибух. Основні радіонукліди

- Продукти поділу: як і в атомному вибуху.
- Продукти реакції злиття: тритій (^3H) та інші радіоізотопи.
- Матеріали зброї: плутоній та уран.

Якщо вибух є "брудним", то утворюється значна кількість радіоактивних продуктів поділу. Якщо вибух є "чистим", то виділяється менше радіоактивних речовин.

“Чиста зброя”

- Нейтронна бомба —тип посиленої радіаційної зброї (ПРЗ), являє собою термоядерну зброю із низькою потужністю, розроблену для максимізації летального нейтронного випромінювання в безпосередній близькості від вибуху при мінімізації фізичної сили самого вибуху.
- Вивільнення нейтронів, згенерованих у результаті реакції ядерного синтезу, відбувається безпосередньо зі зброї, нейтрони не поглинаються іншими її компонентами
- Потік, що використовується як первинна руйнівна дія бойової частини, здатний проникати ворожу броню ефективніше, ніж звичайна бойова частина, роблячи її більш смертельною, як тактичну зброю.

Наслідки ядерного вибуху

- Ударна хвиля
- Світлове випромінювання
- Радіоактивне забруднення
- Електромагнітний імпульс

Розподіл енергії при наземному та повітряному ядерному вибуху

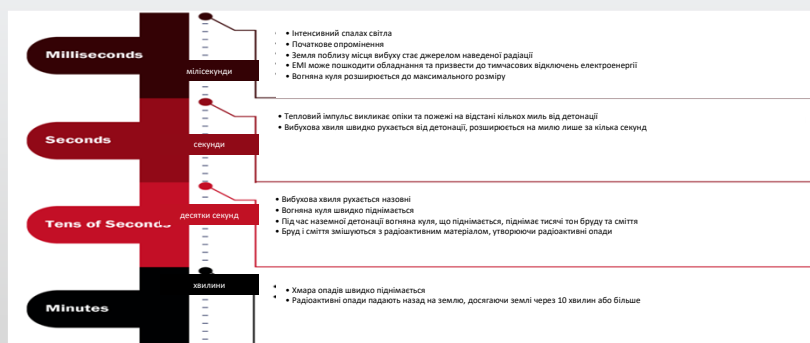
• Наземний вибух:

- 50 % - утворення ударної хвилі
- 30-50 % - світлове випромінювання,
- до 5 % -на проникаючу радіацію та електромагнітне випромінювання
- до 15 % — радіоактивне зараження місцевості

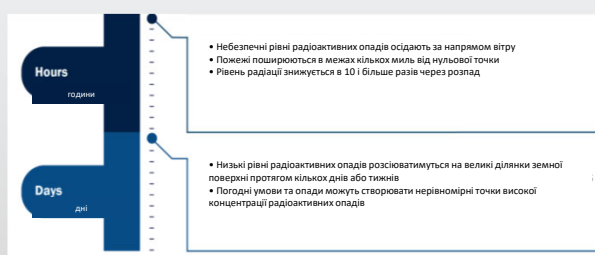
• Повітряний вибух:

- до 10% - ударна хвиля
- 5%-8% - світлове випромінювання
- приблизно 85 % - проникаюча радіація (нейтронне та гамма-випромінювання)

Хронологія ядерної детонації

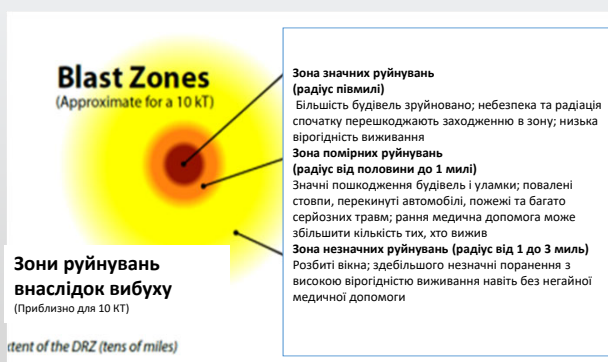


Хронологія ядерної детонації

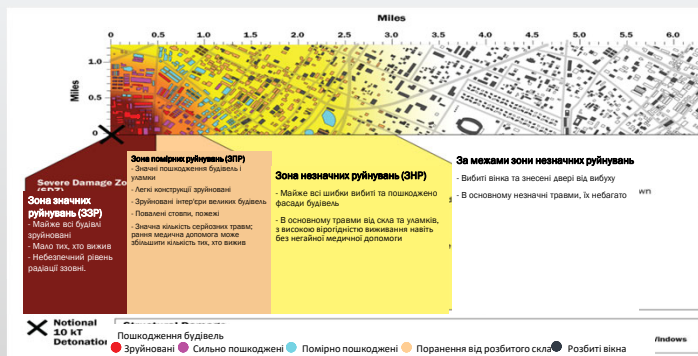


Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation

Зони руйнувань внаслідок вибуху (для 10 кТ)

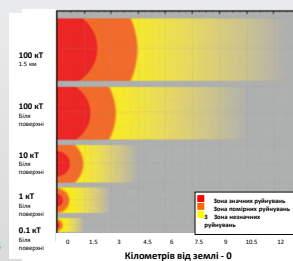


Зони наземного вибуху 10 кТ



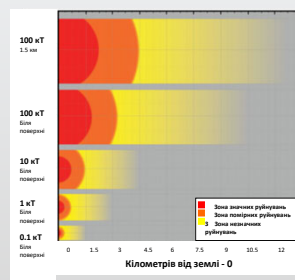
Зони руйнувань - Зона значних руйнувань

- Майже всі будівлі зруйновані
- Мало тих, хто вижив
- Небезпечні рівні радіації
- Ті, хто вижив, повинні сховатися в укриття на 24 години перед евакуацією
- Інфраструктура зруйнована
- Пожежі незначні
- Опіки внаслідок спалахів
- Смертельні дози радіації навіть в укритті



Зони руйнувань - Зона помірних руйнувань

- Значні пошкодження будівель
 - Легкі будівлі зруйновані
 - Зруйновані інтер'єри
- Вітер дує зі швидкістю 160 км/год від центру вибуху, потім повертається в зворотному напрямку, щоб заповнити порожнечу
- Рівень радіаційних опадів може різнитись
- Ті, хто вижив, є пріоритетом для евакуації
- Можуть бути інтенсивні пожежі (опіки)
- Відповідні групи реагування працюють у зоні (зонах)



Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation

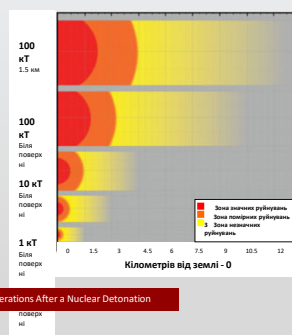


Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



Зони руйнувань - Зона незначних руйнувань

- Розбиті вікна
- Пошкоджені будівлі
- Скло та уламки розлітаються
- Зона з високим рівнем виживання
- Ті, хто вижив, самостійно евакуюються
- Радіаційні опади можуть бути сильними
- Пошкодження від ударної хвилі внаслідок відбиття від поверхні землі



Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



Зони радіоактивних випадів

Зона небезпечного опромінення (Понад 10 Р/год)

- Будьте в укритті крім випадків
 - Виконання нагальних завдань
 - Проведення рятувальних операцій
 - Контролю та вимірювання потужності доз

Зона підвищеного опромінення (До 10 Р/год)

- Залишайтеся біля укриття
- Оцініть безпосередні ризики
- Поінформуйте місцеву владу

Ризик отримання зовнішнього опромінення переважає, однак захистіться від отримання внутрішнього опромінення за допомогою ЗІЗ

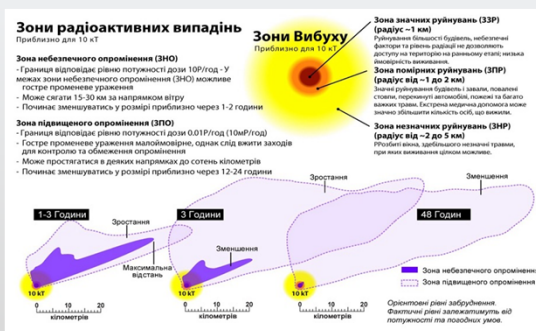
Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



Зони радіоактивних випадів



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation

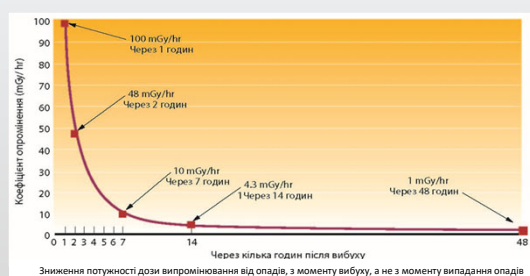


Зменшення з часом потужності дози зовнішнього випромінювання, для ілюстрації обрано 1000 Рентген/год

Час після детонації (год:хв)	Експозиційна доза (Р/год)
00:15	1,444
00:30	686
01:00	299
02:00	130
04:00	57
08:00	35
12:00	15
24:00	7
48:00	3
96:00	1

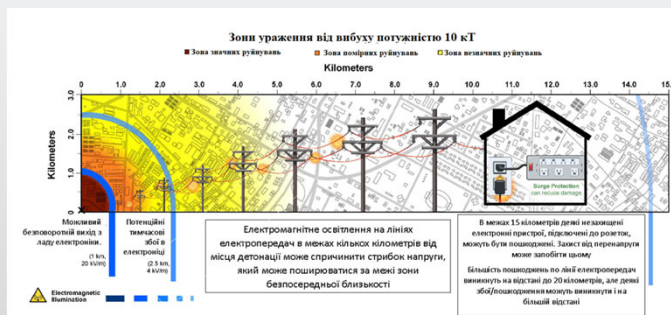
- Радіаційні опади виділяють понад 50% своєї енергії протягом першої години, а потім продовжують розпадатися. Ніколи не буде підвищення рівня радіації опадів.

Приклад швидкості розпаду радіоактивних опадів Потужність дози (100 Р/год) початкове значення



https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_nuc-detonation-planning-guide.pdf

Вплив електромагнітного імпульсу (EMI) на інфраструктуру



https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_0307_CISA_EMP-Protection-Resilience-Guidelines.pdf

Сила електромагнітного випромінювання залежно від висоти вибуху

В межах нижче 4 км - відносно слабкий,
Більш значний - за умови вибуху на висоті 4-30 км
Особливо сильний - при висоті підриву більше 30 км

Загрози

- Сліпота внаслідок спалаху/травми очей
- Випромінювання
 - Первинне
 - Залишкове
 - Нейтронна активація
- Електромагнітний імпульс
- Вогняна куля/Сильна спека
 - Опіки від спалаху
 - Опіки від полум'я
- Вибухова хвиля



Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



Види ушкоджень від ядерної зброї

- Вибухова хвиля (50% енергії)
 - Травми, переломи, ушкодження легенів, розриви внутрішніх органів і барабанних перетинок
- Термічні (35% енергії)
 - Опіки і осліплення внаслідок спалаху
- Іонізуюче випромінювання (15% енергії)
 - (Первинне (5%) і радіаційні опади/залишкове (10%))
 - Променева хвороба і пізні прояви

ПРИЧИНИ СМЕРТІ	ХІРОСИМА	НАГАСАКІ
ОПІКИ	60%	80%
ТРАВМИ	30%	14%
РАДІАЦІЯ	10%	6%



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



Основні ушкодження після ядерного вибуху

- Травми
- Термічні опіки
- Променеві ураження шкіри
- Гостра променева хвороба
- Комбіновані травми

Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation



Module: Medical Management After a Nuclear Detonation



ГЛОСАРІЙ

Джерела іонізуючих випромінювань на Землі:

- **Космічне випромінювання** (Галактичне випромінювання + Сонячне випромінювання)
- **Випромінювання радіонуклідів** (Випромінювання природних радіонуклідів + Випромінювання штучних радіонуклідів + випромінювання техногенних джерел)

Радіоактивна родина (радіоактивний ряд) - послідовність взаємопов'язаних радіоактивних атомів, в якій кожний наступний атом утворюється в результаті альфа або бета розпаду попереднього атома

Космогенні радіонукліди - радіонукліди, що утворюються в атмосфері під впливом космічного випромінювання

Природний радіаційний фон – рівень іонізуючого випромінювання на поверхні Землі, у приземному шарі атмосфери та інших об'єктах навколишнього середовища, що формується за рахунок космічного випромінювання та випромінювання природних радіонуклідів

Потужність природного радіаційного фону в різних регіонах Землі варіює в межах від 0,05 до 0,15 мкЗв/год., у середньому - 0,1 мкЗв/год., або приблизно 10 мкР/год

Потужність космічного випромінювання, залежить від широти місцевості, на рівні моря – 0,01–0,03 мкЗв/год.

Середня ефективна доза зовнішнього опромінення, яку людина отримує за рік від радіонуклідів земного походження – біля 0,7 мЗв

ГЛОСАРІЙ

Міжнародна шкала ядерних подій INES (International Nuclear Energy Scale)

- 0 рівень - Подія нижче шкали
- 1 рівень – Аномальна ситуація
- 2 рівень – Інцидент
- 3 рівень - Серйозний інцидент
- 4 рівень - Аварія з локальними наслідками
- 5 рівень – Аварія з широкими наслідками
- 6 рівень - Серйозна аварія
- 7 рівень - Глобальна аварія

Основні радіонукліди при атомному вибуху

- **Продукти поділу:** широкий спектр радіоактивних ізотопів, що утворюються в результаті розщеплення ядер урану або плутонію.
- **Матеріали зброї:** плутоній-239, уран-235 та уран-238
- **Продукти активації:** радіоактивні ізотопи, що утворюються в результаті опромінення нейтронами матеріалів навколишнього середовища

Основні радіонукліди при термоядерному вибуху

- **Продукти поділу:** як і в атомному вибуху.
- **Продукти реакції злиття:** тритій (3H) та інші радіоізотопи.
- **Матеріали зброї:** плутоній та уран.

“Чиста зброя” - Нейтронна бомба, посиленої радіаційної зброї (ПРЗ), являє собою термоядерну зброю із низькою потужністю, розроблену для максимізації летального нейтронного випромінювання в безпосередній близькості від вибуху при мінімізації фізичної сили самого вибуху

ГЛОСАРІЙ

Наслідки ядерного вибуху:

- Ударна хвиля
- Світлове випромінювання
- Радіоактивне забруднення
- Електромагнітний імпульс

Зони руйнувань внаслідок повітряного вибуху (10 кТ):

- **Зона значних руйнувань** (радіус 800 м), низька вірогідність виживання
- **Зона помірних руйнувань** (800-1500 м), рання медична допомога може збільшити кількість тих, хто вижив
- **Зона незначних руйнувань** (радіус від 1,5 -5 км), висока вірогідність виживання навіть без негайної медичної допомоги

Зони радіоактивних випадіння: Зона небезпечного опромінення, понад 10 Р/год, Зона підвищеного опромінення, до 10 Р/год

Види ушкоджень від ядерної зброї:

- **Вибухова хвиля** (50% енергії) - Травми, переломи, ушкодження легеней, розриви внутрішніх органів і барабаних перетинок
- **Термічні** (35% енергії)- Опіки і осліплення внаслідок спалаху
- **Іонізуюче випромінювання** (15% енергії, - Первинне (5%) і радіаційні опади/залишкове (10%)- Променева хвороба і пізні прояви

Основні ушкодження після ядерного вибуху:

- Травми
- Термічні опіки
- Променеві ураження шкіри
- Гостра променева хвороба
- Комбіновані травми

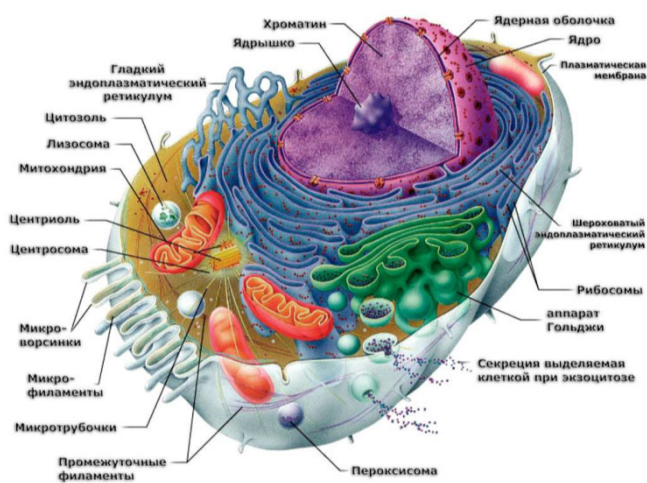
Загальні принципи медичних дій у випадку радіаційної/ ядерної надзвичайної ситуації

МОДУЛЬ 2. Джерела радіоактивності на Землі та як радіація впливає на живі організми

Лекція 4.

Ушкодження біологічних молекул. Репарація ДНК. Вплив радіації на надмолекулярні комплекси клітини. Хромосомні аберації. Радіочутливість клітин на різних фазах клітинного циклу. Форми загибелі клітин під впливом випромінювання. Клітинні популяції і їх відновлення після впливу випромінювання. Радіочутливість різних органів та тканин організму людини. Стохастичні і нестохастичні ефекти. Гостра променева хвороба людини. Цереброваскулярний, шлунково-кишковий та гомопоетичний синдроми. Реакції тканин шкіри на опромінення. Значення режиму опромінення для розвитку променевої хвороби. Хронічна променева хвороба. .

Будова клітини еукаріот

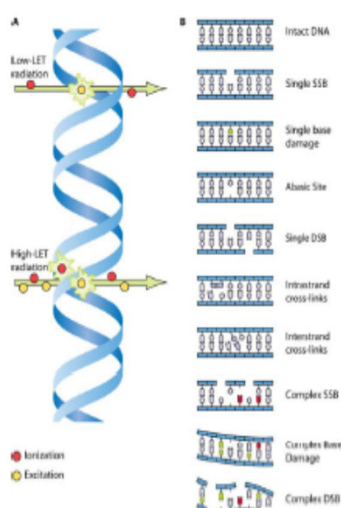


Радіаційно-індуковані ушкодження біологічних молекул

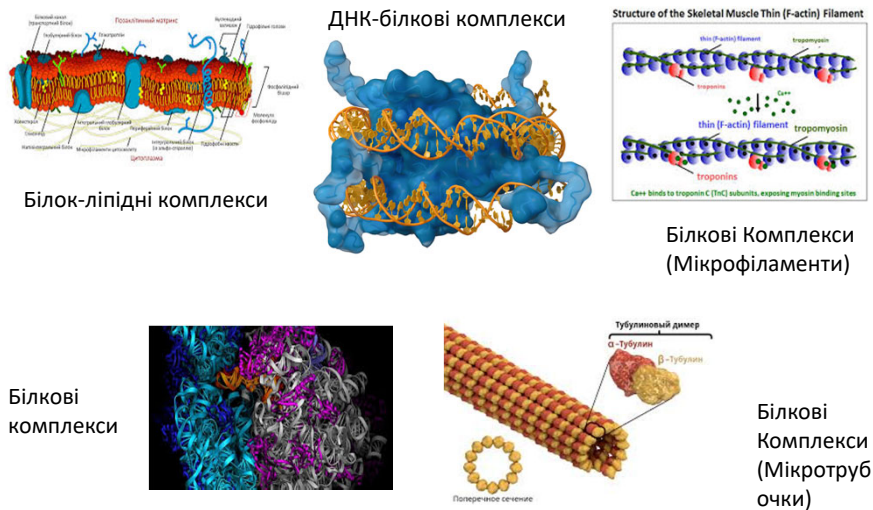
Розподіл поглиненої енергії при опроміненні клітини:

- Вода — 70-85%
- Білки — 10-20%
- Нуклеїнові кислоти (ДНК і РНК) — 1-7%
- Ліпіди — 2-8%
- Вуглеводи — 1-5%
- Метаболіти — 0,4-2%
- Мінеральні речовини — 2-4%

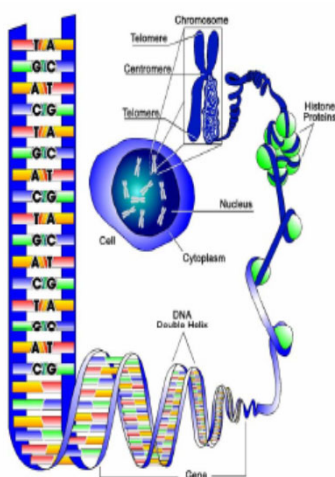
Види ушкоджень ДНК під впливом ІВ з різною ЛПЕ



Радіаційне ушкодження надмолекулярних комплексів у клітині

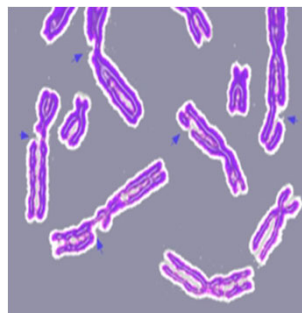


Схематичне зображення різних рівнів організації хромосом



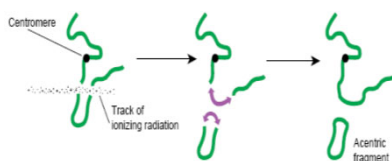
Ушкодження хромосом під впливом випромінювання

- Хромосомні мутації (аберації хромосом) - це зміни в структурі хромосом, які можуть виникати внаслідок розриву, переміщення або випадіння частин хромосом. Вони можуть мати різні наслідки для організму, включаючи порушення розвитку та спадкові захворювання.
- Види хромосомних мутацій:
 - Делеція: Втрата ділянки хромосоми.
 - Дуплікація: Повторення ділянки хромосоми.
 - Інверсія: Зміна напрямку ділянки хромосоми.
 - Транслокація: Переміщення ділянки однієї хромосоми на іншу.
 - Інсерція: Вставка ділянки однієї хромосоми у іншу.

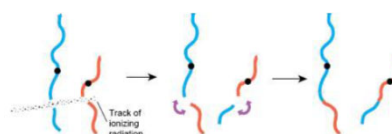


Ушкодження хромосом під впливом випромінювання

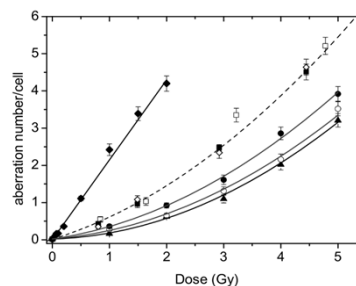
Хромосомні делеції



Транслокації хромосом

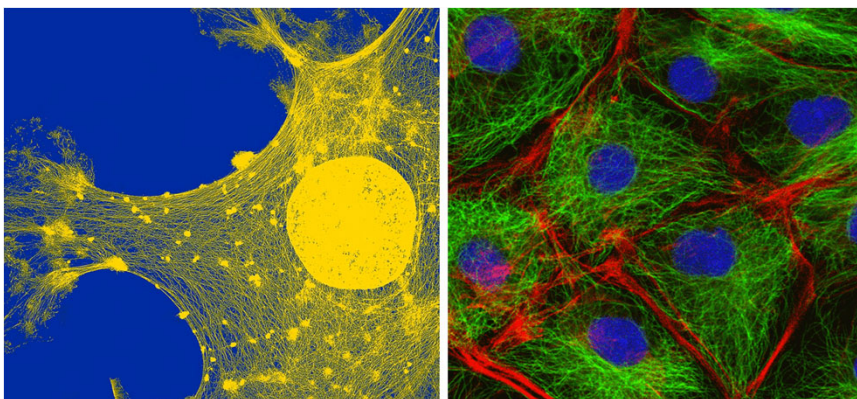


Формування хромосомних аберацій в лімфоцитах людини під впливом корпускулярного випромінювання з різною ЛПЕ



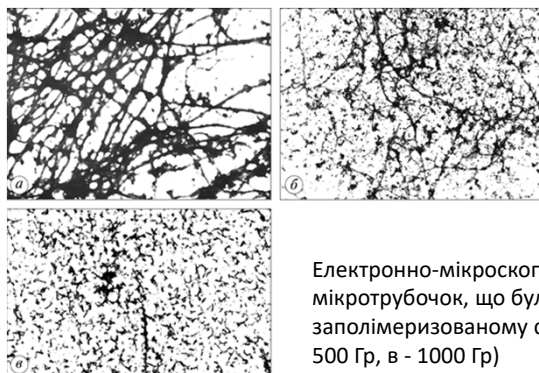
Біологічна дозиметрія

Клітинний скелет і опромінювання



Це динамічна структура, що постійно змінюється, до функцій якої входить підтримка і адаптація форми клітини до зовнішніх дій, екзо- і ендоцитоз, забезпечення руху клітини як цілого, активний внутрішньоклітинний транспорт і клітинне ділення.

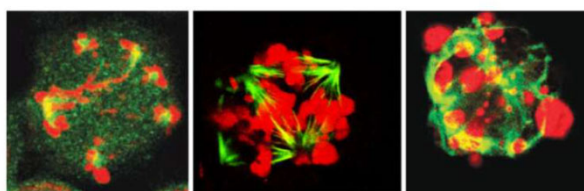
Вплив випромінювання на систему мікротрубочок



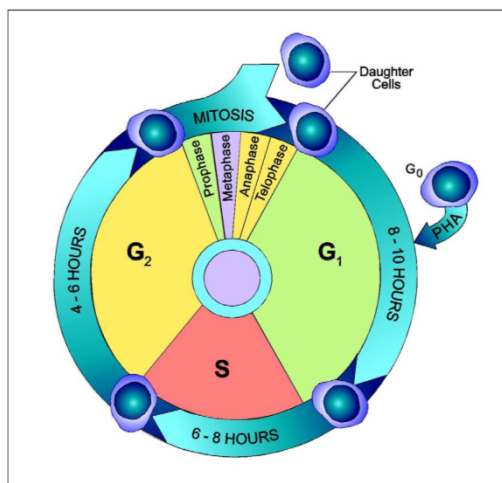
Електронно-мікроскопічні фотографії мікротрубочок, що були опромінені в заполімеризованому стані (а – 100 Гр, б - 500 Гр, в - 1000 Гр)

Мітотична катастрофа

Причини МК: пошкодження ДНК (контролю мітозу), порушення веретена поділу (формування багатополюсного веретена поділу). При порушенні процесів апоптозу (перевірка в точці рестрикції) поліплоїдних (зокрема, тетраплоїдних) клітин, вони здатні надалі здійснювати клітинний цикл і мітоз.



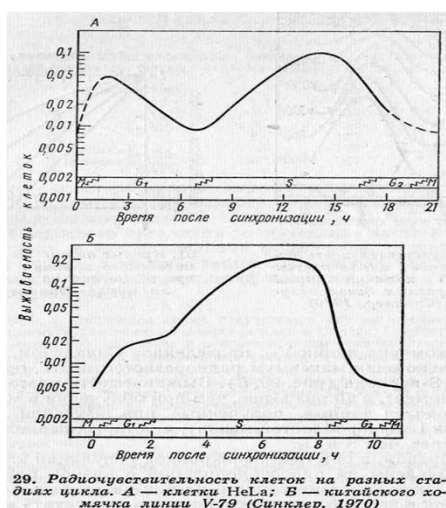
Клітинний цикл і фази мітозу



Радіочутливість клітин на різних фазах клітинного циклу



Радіочутливість клітин на різних фазах клітинного циклу



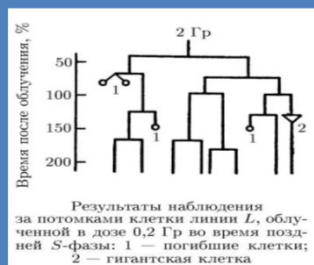
Радіочутливість клітин

Загибель клітин при опроміненні залежить від ступеню їх диференційованості, проліферативної активності і тривалості мітозу (правило Бергоньє-Трібондо, 1906 р.)

Типи радіаційної загибелі клітин залежать від їх проліферативної активності і стадії клітинного циклу

Репродуктивна загибель (мітотична загибель, відстрочена загибель)
(характерна для клітин, які активно проліферують, або штучно стимульовані до активної проліферації)

Інтерфазна загибель (характерна для диференційованих клітин, які знаходяться в інтерфазі)



Форми клітинної загибелі

Програмована клітинна загибель, або програмована клітинна смерть (ПКЗ, Programmed cell death) — загибель клітини, яка відбувається за рахунок запрограмованих внутрішньоклітинних процесів.

З точки зору морфології тривалий час виділяли такі основні види клітинної загибелі:

Клітинна загибель I типу, або апоптоз. При цій формі клітинної загибелі відбуваються стиснення цитоплазми, конденсація хроматину, фрагментація ядра і т.зв. *блебінг клітинної мембрани*, тобто відбруньковування від неї везикул. Зрештою весь вміст клітини розпадається на везикули (апоптотичні тільця), які фагоцитуються сусідніми клітинами і розщеплюються в їхніх лізосомах.

Клітинна загибель II типу, або автофагія. При автофагії в цитоплазмі підупалої клітини формується безліч вакуолей, які потім фагоцитуються і руйнуються сусідніми клітинами.

Клітинна загибель III типу, або некроз. Некроз характеризується повною відсутністю рис, притаманних апоптозу та автофагії. Залишки зруйнованої клітини запускають запалення.

Форми клітинної загибелі

Пізніше було прийнято більш складну класифікацію видів програмованої клітинної загибелі, яка побудована не на морфологічних деталях, а на генетичних, біохімічних, фармакологічних і функціональних особливостях. Виділені таким чином види загибелі далі ділять на дві групи за морфологією: до однієї відносять види смерті, які морфологічно близькі до апоптозу, а в іншу — ті, які морфологічно близькі до некрозу. Таким чином, для кожного виду програмованої клітинної загибелі властивий свій набір властивостей, від повністю апоптотичного до повністю некротичного.

Зараз виділяють такі форми клітинної загибелі:

Залежна від лізосом клітинна загибель (Lysosome-dependent cell death, LDCD);	Некроптоз (англ. Necroptosis);
Залежна від автофагії клітинна загибель (Autophagy-dependent cell death, ADCD);	Фероптоз (Ferroptosis);
Імуногенна клітинна загибель (Immunogenic cell death, ICD);	Піроптоз (Pyroptosis);
Внутрішній апоптоз (Intrinsic apoptosis);	Партанатоз (Parthanatos);
Зовнішній апоптоз (Extrinsic apoptosis);	Ентоз (Entosis);
Некроз, залежний від проникності мітохондрій (MPT) (MPT-driven necrosis)	NETоз (NETosis).

Вплив випромінювання на загибель клітин

ІВ може викликати програмовану загибель клітин (апоптоз) або некроз (пасивну смерть), залежно від дози, типу та тривалості опромінення. У низьких дозах опромінення може стимулювати апоптоз, а у високих дозах - некроз.

Загибель клітин при опроміненні залежить від їх диференційованості, проліферативної активності та тривалості мітозу.

Приклади радіаційно-індукованих некрозів

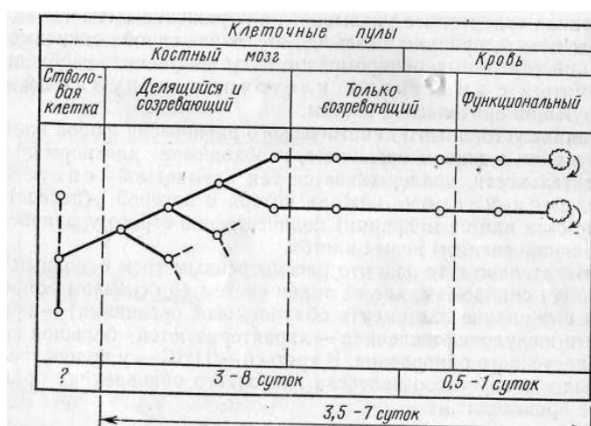


Радіаційно-індукований
торакальний некроз з
легеневою шкірною фістулою



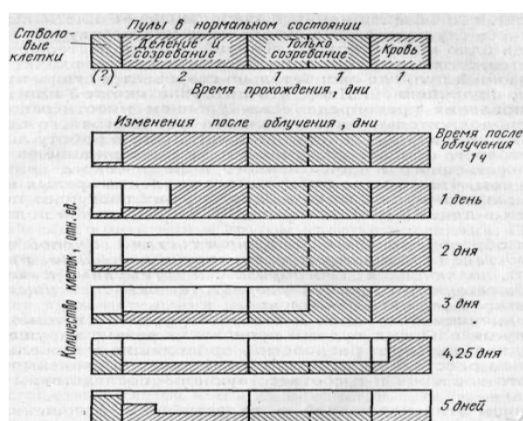
Радіаційний дерматит

Клітинні популяції як приклад самовідтворюваних біологічних систем після опромінення



64. Модель системы клеточного обновления (Бонд и др. 1971). Время, указанное в нижней части рисунка, отражает порядок величин, характерных для гранулоцитопоза млекопитающих в том числе и человека

СПУСТОШЕННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ КЛІТИННИХ ПУЛІВ ПІД ВПЛИВОМ ОПРМІНЕННЯ



65. Схема эффектов, возникающих в системе клеточного обновления вследствие внезапного опустошения самых ранних пролиферирующих компонентов в результате облучения (Бонд и др., 1971)

Стохастичні і нестохастичні ефекти опромінення

Детерміновані ефекти (нестохастичні) – ефекти радіаційного впливу- ефекти, що виникають лише при перевищенні певного дозового порогу і величина їх прояву від величини поглиненої дози (гостра променева хвороба, хронічна променева хвороба)

Стохастичні ефекти – безпорогові ефекти радіаційного впливу, ймовірність виникнення яких існує при будь-яких дозах ІВ і зростає із збільшенням дози, тоді як їх величина їх прояву не залежить від поглиненої дози

Основні характеристики нестохастичних ефектів

- Існує поріг дози, після якої проявляються нестохастичні ефекти
- Чим вища доза, тим більша величина прояву.
- Нестохастичні ефекти можуть проявлятися як у ранні терміни після опромінення, так і з часом (ранні та пізні ефекти).

Приклади нестохастичних ефектів:

- Гостра променева хвороба.
- Променеві опіки.
- Променева катаракта.
- Помутніння кришталика ока, що розвивається внаслідок опромінення.
- Ураження шкіри, слизових оболонок, крові та інших органів.

Поріг детермінованих (нестохастичних) ефектів у дорослих людей для найбільш радіочутливих тканин

Тканина та ефекти	Поріг	
	Доза однократного короткочасного опромінення, Зв	Потужність дози фракціонованого або пролонгованого опромінення, Зв/рік
Яєчка		
Тимчасова стерильність	0,15	0,4
Постійна стерильність	3,5-6,0	2,0
Яєчники Стерильність	2,5-6,0	>0,2
Кришталіки		
Виявлені помутніння	0,5-2,0	>0,1
Порушення зору (катаракта)	5,0	>0,15
Червоний кістковий мозок		
Пригнічення кровотворення	0,5	>0,4

Основні характеристики стохастичних ефектів радіації

- Немає чіткого порогу дози, нижче якої ефекти не проявляються.
- Ймовірність їх виникнення збільшується зі збільшенням дози.
- Не існує безпечної дози радіації, оскільки будь-яка доза несе певний ризик виникнення стохастичних ефектів.

Приклади:

Злоякісні новоутворення (ракові захворювання).

Генетичні ураження, які можуть передаватися нащадкам.

Радіочутливість різних органів і тканин людини

Всі органи і тканини за радіочутливістю їх клітин ділять на 3 групи:

- *Високочутливі*, дози до 6 Гр
(ембріон, лімфоїдна тканина, кістковий мозок, статеві залози)
- *Помірно чутливі*, дозовий діапазон від 6 до 30 Гр
(слинні залози, епітелій слизових оболонок, ростковий шар епідермісу і волосяних фолікулів, ендотелій судин)
- *Малочутливі*, дози опромінення вищі від 30 Гр
(печінка, нирки, хрящова і кісткова тканини, периферійні нерви, м'язова і жирова тканини)

(Закон Бергоньє і Трибондо!)

Які клітини найбільш чутливі?

Більш чутливі до опромінення

- Недиференційовані
- Ті, які швидко діляться
- Ті, які мають високу метаболічну активність

Зрілі лімфоцити
Сперматогонії
Мієлобласти
Клітини кишкової крипти (товста кишка)
Епідермальні клітини шкіри (шкіра)
Ендотеліальні клітини (кровоносні судини)
Клітини шлункових залоз
Остеобласти
Хондробласти
Хондроцити
М'язові клітини
Нервові клітини

Менше чутливі до опромінення (або більш стійкі)

- Диференційовані
- З повільним поділом або його відсутність
- З нижчою швидкістю метаболізму

Радіочутливість різних тканин і органів

**Найбільш
радіочутливими є
тканини з високою
швидкістю клітинного
поділу, такі як
кістковий мозок, шкіра
та слизові оболонки.**

1. Лімфоїдні клітини
2. Полінуклеари
3. Еозинофіли
4. Епітелій фолікулів
5. Сперматогонії
6. Епітелій волосяних фолікулів
7. Епітелій слинних залоз
8. Епітелій шкіри
9. Епітелій легеневих альвеол
10. Тубулярний епітелій нирок
11. Ендотелій кровоносних судин
12. Ендотелій плеври
13. Ендотелій очеревини
14. Кістки
15. Сполучна тканина
16. М'язи

Фактори, що впливають на відповідь організму

- Радіочутливість клітин і тканини
- Доза опромінення
- Тривалість впливу
- Ступінь запальної реакції
- Вік
- Супутні захворювання
- Наявність хвороб, зумовлених генетичним дефектом репарації ДНК (наприклад, атаксія-телангіектазія, синдром Блума, анемія Фанконі)

Значення режиму опромінення

Загальне одномоментне опромінення людини дозою в 1-4 Гр викликає виникнення променевої хвороби.

Опромінення такою ж дозою невеликої ділянки тіла не веде до виникнення загального захворювання організму, але викликає променевою еритему.

Летальні дози при опроміненні окремих частин тіла:

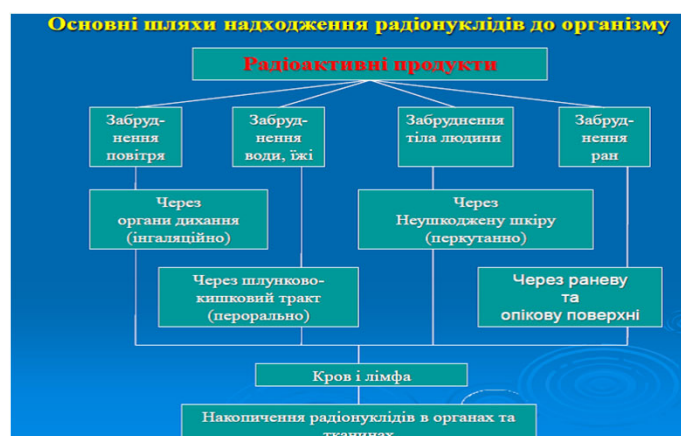
Голова – 20 Гр

Нижня частина живота – 50 Гр

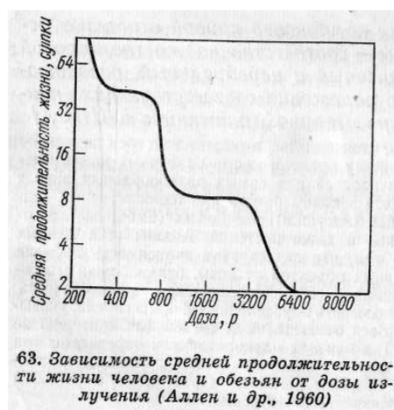
Грудна клітка – 100 Гр

Кінцівки – 200 Гр

Внутрішнє опромінення



Вплив випромінювання в різних дозах на тривалість життя людини та приматів



Радіочутливість різних біологічних об'єктів

Біологічний вид	Доза γ-випромінювання, яка викликає смерть 50% опромінених (Гр)
Найпростіші	1000 – 3000
Рослини	10 – 1500
Дріжджі	300 – 500
Змії	80 – 200
Комахи	10 – 100
Риби	8 – 20
Птахи	8 – 20
Кролики	9 – 10
Миші	6 – 15
Пацюки	7 – 9
Мавпи	2,5 – 6
Люди	2,5 – 3,5
Віслюки	2,0 – 3,8
Собаки	2,5 – 3,0
Вівці	1,5 – 2,5

Вплив випромінювання на тривалість життя різних видів тварин

Таблиця 3

Величина среднелетальных доз при средней продолжительности жизни 30, 8, 5 и 2 дней для различных видов животных (В. Бонд и др. 1974)

Объект исследования	Вид излучения и энергия, кэВ	Среднелетальные дозы			
		ЛД _{50/30} , рад	ЛД _{50/8} , Р	ЛД _{50/5} , Р	ЛД _{50/2} , Р
Мышь . . .	X-200	640	—	1260	18000—40000
Мышь степная . . .	X-250	705	~2000	—	—
Крыса . . .	X-250	714	—	808	20000—30000
Собака . . .	X-250	250	—	1300	—
Масаса mulatta . . .	1,1 МэВ	—	~1500	—	10000
Масаса ghesus . . .	1,2-1,4 МэВ	—	~1000	—	5000
Кролик . . .	X-250	750	—	—	—
Морская свинка . . .	X-200	450	~1500	—	6000
Хомячок . . .	X-200	610	~1000	—	20000
Свинья . . .	X-250	856	—	—	—
Козел . . .	X-1000	250	—	—	22000
Осел . . .	X-200	240	—	—	—
Человек . . .	нейтроны-γ	—	—	2000 рад	25 000 рад
	1,1 МэВ	255	—	—	—
	нейтроны-γ	374	—	—	556 фэр
	γ	300(?)	(?)	—	—

Види ушкоджень від ядерної зброї

- Вибухова хвиля (50% енергії)
 - Травми, переломи, ушкодження легенів, розриви внутрішніх органів і барабанних перетинок
- Термічні (35% енергії)
 - Опіки і осліплення внаслідок спалаху
- Іонізуюче випромінювання (15% енергії)
 - Первинне (5%) і радіаційні опади/залишкове (10%)
 - Променева хвороба і пізні прояви

ПРИЧИНИ СМЕРТІ	ХІРОСІМА	НАГАСАКІ
ОПІКИ	60%	80%
ТРАВМИ	30%	14%
РАДІАЦІЯ	10%	6%

ГОСТРА ПРОМЕНЕВА ХВОРОБА ЛЮДИНИ

ЛД50/60

- Доза, яка спричинить смерть 50% населення протягом 60 днів

- Здорові, молоді люди без терапії: 3.5 – 4.0 Гр
- З терапією (антибіотики плюс підтримуюча терапія: 6.0 – 7.0 Гр
- ЛД50/60 вища, коли колонієстимулюючі фактори додають до вищевказаної терапії

Клінічні синдроми гострої променевої хвороби

Субклінічна стадія	0 – 1 Гр
Гемопоетичний (кістково-мозковий)	> 1 або 2 Гр
Гастроінтестинальний	> 5-6 Гр
Нейроваскулярний синдром	> ~10 Гр
Ураження шкіри	> 6 Гр

Субклінічна стадія (< 1 Гр, 100 рад)

Гр	Вплив
< 0.10 Гр (10 сГр)	Немає помітної різниці між пацієнтами, які піддавалися опроміненню, та пацієнтам, які не зазнавали впливу радіації
> 0.12 Гр (12 сГр)	Кількість сперматозоїдів зменшується до мінімуму приблизно на 45ий день
0.20 Гр (20сГр)	Підвищення частоти аберацій хромосом у всьому тілі – без ознак чи симптомів
0.75 – 1.0 Гр (75 – 100 сГр)	Ураження кісткового мозку – нудота/блювання приблизно у 10% населення

Гемопоетичний субсиндром (>1 Гр)

- Втрата лімфоцитів і нейтрофілів
 - Потім зниження еритроцитів і тромбоцитів
 - Значні зміни клітин крові (панцитопенія)
 - Можливі кровотечі
- Імунна дисфункція
- Інфекції та сепсис
- Ускладнення загоєння ран

Гастроінтестинальний синдром (ШКТ)



Некроз тонкої кишки при аутопсії особи, яка отримала 20 Гр під час аварії в Інституті атомної енергії ім. І. В. Курчатова, Воробйов, Стовбурові клітини 15 (додаток 2): 269, 1997.

- Втрата епітеліальних клітин ШКТ
- Бактеріальна транслокація
- Крововиливи в просвітах шлунково-кишкового тракту
- Порушення всмоктування ШКТ

Нейроваскулярний синдром (>10 Гр)

- **Ранні симптоми**
 - Нудота і блювота починаються протягом декількох хвилин
 - Сплутаність свідомості та дезорієнтація
 - Важка гіпертензія
- **Пізніші симптоми**
 - набряк мозку
 - Атаксія / Судоми
 - Кома
 - Смертність протягом 24-48 годин при високих дозах
- **Лікування**
 - Інтенсивна терапія
 - Перехід на паліативну допомогу

Променеве ураження шкіри

- Шкіра є однією з найбільших систем органів
- Променеве ураження шкіри може виникнути з або без залучення інших систем органів
- Може бути таким же смертельним, як синдром ШКТ
- 16/28 смертей у Чорнобилі внаслідок променевого ураження шкіри*
- Відстрочений прояв пожиттєвого болю та втрата функціональності

*Gottlober et al, Rad Res 2001)

Променеве ураження шкіри: гострі реакції та відтерміновані ефекти

- **Гострі реакції**
 - Почервоніння, набряк, утворення пухирів
 - Виразки та некроз тканин
- **Відтерміновані ефекти**
 - Фіброз, атрофія (склероз) і телеангіектазія
 - Проявляється через місяці - роки після початкового впливу

Дози ураження шкіри

Доза [Гр]	Прояв	Термін
3	Зникнення волосяного покриву	Починається на 14-17
6	Еритема (відрізняється від термічного опіку)	Від хвилин до тижнів залежно від дози
10 – 15	Суха десквамація	2-3 тижні після впливу, залежно від дози
15 – 20	Волога десквамація	2-3 тижні після впливу, залежно від дози
> 25	Виразка, радіонекроз	> 21 день

Стадії протікання ГПХ



Опромінення та прогноз наслідків опромінення всього тіла (Гоанс і Васеленко, 2005)

Потужність дози, Грей (рад)	Продромальна фаза	Прояв хвороби	Прогнози (без лікування)
0.5-1.0 (50-100)	помірна	зменшення кількості клітин	виживання
1-2 (100-200)	від помірної до середньої	руйнування кісткового мозку	висока вірогідність виживання
2-3.5 (200-350)	середня	руйнування кісткового мозку середнього-важкого ступеню	можливе виживання
3.5-5.5 (350-550) LD ₅₀	важка	руйнування кісткового мозку важкого ступеню, помірне ураження ШКТ	смерть у 50% протягом 3-6 тижнів
5.5-7.5 (550-750)	важка	панцитопенія, ураження ШКТ середнього ступеню	вірогідність смерті протягом 2-3 тижнів
7.5-10 (750-1000)	важка	ураження ШКТ та кісткового мозку, гіпотонія, гарячка	смерть протягом 1-2,5 тижнів
Більше 10 (більше 1000)	важка	важке ураження ШКТ, пневмонія, зміна психічного стану, когнітивна дисфункція, гарячка, шок, смерть	смерть може настати протягом декількох годин, напевно протягом 5-12 днів



Module: First Responder and Provider Considerations After a Nuclear Detonation



Хронічна променева хвороба

Хронічна променева хвороба (ХПХ) - це стан, що розвивається в результаті тривалої дії іонізуючого випромінювання в малих дозах, що перевищують встановлені ліміти. Це, в свою чергу, призводить до поступових змін у різних органах і системах, особливо у крові та нервовій системі.

ХПХ розвивається внаслідок тривалого опромінювання, як зовнішнього, так і внутрішнього (наприклад, при поглинання радіоактивних речовин).

Хвороба проявляється поступово, з повільним наростанням тяжкості. Для ХПХ характерні зміни в кровотворній системі (лімфопенія, анемія), порушення нервової системи, а також ураження інших органів.

Для ХПХ характерний тривалий відновний період, що може займати місяці або роки.

Протоколи медичного лікування постраждалих від радіаційних аварій - MEDical TREatment ProtocOLs for Radiation Accident Victims (METROPOL)

METREPOL (іноді транслітерують як METROPOL) — це міжнародна система оцінки тяжкості променевого ураження (Medical Treatment Protocols for Radiation Accident Victims). Вона використовується для медичного сортування та лікування людей, які зазнали впливу радіації (гострої променевої хвороби) внаслідок аварій чи радіаційних інцидентів

Протоколи медичного лікування постраждалих від радіаційних аварій - MEdical TReatment ProtocOLs for Radiation Accident Victims (**METROPOL**)

Припущення:

- Повне або майже повне опромінення іонізуючим випромінюванням
- Немає значних фізичних травм
- Немає значних термічних опіків
- Немає супутніх інфекцій або порушень обміну речовин



Як працює система оцінки METROPOL?

Принцип базується на оцінці чотирьох основних систем органів, які найбільше страждають від іонізуючого випромінювання. Кожна система оцінюється за шкалою від 0 (без пошкоджень) до 4 (незворотні/критичні ураження):

H (Hematologic/Гематологічна) — стан кровотворної системи та кісткового мозку.

N (Neurovascular/Нейроваскулярна) — пошкодження нервової та судинної систем (спостерігається при дуже високих дозах опромінення).

C (Cutaneous/Шкірна) — тяжкість променевих опіків шкіри та слизових оболонок.

G (Gastrointestinal/Шлунково-кишкова) — ступінь ураження кишківника, що викликає нудоту, блювання та діарею.

METREPOL

Система органів	Ступінь ушкодження			
	Легка	Помірна	Важка	Дуже важка або фатальна
Кістковий мозок	Висока вірогідність відновлення	Відновлення ймовірне	Відновлення ймовірне	Відновлення малоімовірне
ШКТ	Висока вірогідність відновлення	Відновлення з ймовірним дефіцитом	Відновлення з ймовірним дефіцитом	Відновлення малоімовірне
Шкіра	Висока вірогідність відновлення	Ймовірне відновлення без дефіциту	Відновлення з ймовірним дефіцитом	Відновлення малоімовірне або відновлення з дефіцитом
Нервово-судинна системи	Висока вірогідність відновлення	Відновлення з ймовірним дефіцитом	Відновлення із значним дефіцитом	Відновлення малоімовірне або відновлення із значним дефіцитом

METREPOL

- Літерний код для систем організму:
H (кровотворення), G (ШКТ),
C (шкіра), N (нерви та судини)
- Цифри вказують на ступінь тяжкості
- Приклад: H3 G3 C1 N2:
 - Важке порушення кровотворення
 - Помірні ураження ШКТ та неврологічної системи
 - Легкі ураження шкіри
 - Загальна категорія надання допомоги - 3

ГЛОСАРІЙ

ДНК, дезоксирибонуклеїнова кислота, - макромолекула, що складається з 2-х ланцюжків, носій генетичної інформації організму

Види ушкодження ДНК (генетичного матеріалу клітини), що можуть бути викликані опроміненням:

- Однотиткові розриви одного з ланцюгів ДНК
- Двотиткові розриви ДНК
- Формування поперечних зшивок між азотистими основами ДНК

Репарація ДНК – здатність клітини відновлювати структуру ушкодженої молекули ДНК

Хромосомні мутації (аберації хромосом) - зміни в структурі хромосом, які можуть виникати внаслідок розриву, переміщення або випадіння частин хромосом. Вони можуть мати різні наслідки для організму, включаючи порушення розвитку та спадкові захворювання.

М-фаза, мітоз – фаза клітинного циклу, на якій здійснюється поділ материнської клітини на 2 дочірні клітини, **найбільш радіочутлива фаза клітинного циклу**

Правило Бергоньє-Трібондо - загибель клітин при опроміненні залежить від ступеню їх диференційованості, проліферативної активності і тривалості мітозу

Репродуктивна загибель (мітотична загибель, відстрочена загибель) клітин - загибель клітин, які активно проліферують, або штучно стимульовані до активної проліферації

Інтерфазна загибель – загибель клітин, , що не діляться у момент опромінення, оскільки знаходяться в інтерфазі, та для диференційованих клітин, що втратили здатність до поділу

ГЛОСАРІЙ

Програмована клітинна загибель, або програмована клітинна смерть — загибель клітини, яка відбувається за рахунок запрограмованих внутрішньоклітинних процесів.

Форми клітинної загибелі, що викликає опромінення:

- Клітинна загибель I типу - апоптоз.
- Клітинна загибель III типу- некроз.

Детерміновані ефекти (нестохастичні) ефекти радіаційного впливу - ефекти, що виникають лише при перевищенні певного дозового порогу і величина їх прояву від величини поглиненої дози (гостра променева хвороба, хронічна променева хвороба)

Стохастичні ефекти – безпорогові ефекти радіаційного впливу, ймовірність виникнення яких існує при будь-яких дозах ІВ і зростає із збільшенням дози, тоді як їх величина їх прояву не залежить від поглиненої дози

Класифікація клітин організму за групами радіочутливості:

- Високочутливі , дози до 6 Гр,(ембріон, лімфоїдна тканина, кістковий мозок, статеві залози)
- Помірно чутливі , дозовий діапазон від 6 до 30 Гр,(слинні залози, епітелій слизових оболонок, ростковий шар епідермісу і волосяних фолікулів, ендотелій судин)
- Мало чутливі, дози опромінення вище від 30 Гр (печінка, нирки, хрящова і кісткова тканини, периферійні нерви, м'язова і жирова тканини)

Фактори, що визначають ступінь прояву біологічного ефекту від впливу радіації:

- Вид ІВ (Іонізуючого Випромінювання)
- Величина поглиненої дози ІВ
- Розподіл поглиненої енергії ІВ в організмі
- Радіочутливість організму та окремих органів
- Вид радіаційного впливу (спосіб опромінення)
- Умови навколишнього середовища

ГЛОСАРІЙ

Основні види ушкоджень від ядерної зброї:

- Травми, переломи, ушкодження легенів, розриви внутрішніх органів і барабаних перетинок (вибухова хвиля)
- Опіки і осліплення як результат спалаху (високі температури)
- Променева хвороба і відділені прояви радіаційного впливу (іонізуюче випромінювання у момент вибуху, та радіаційне забруднення місцевості) прояви

Клінічні синдром гострої променевої хвороби (ГПХ)

- Субклінічна стадія, 0 – 1 Гр
- Гемопоетичний (кістково-мозковий) синдром, > 1 або 2 Гр
- Гастроінтестинальний синдром , > 5-6 Гр
- Нейроваскулярний синдром, > ~10 Гр
- Ураження шкіри, > 6 Гр

Стадії протікання ГПХ:

- Продромальний період, 0-48 год
- Латентна фаз, години – 21 день
- Маніфестація, години-30 днів
- Одужання, або смерть, години -> 60 днів

Хронічна променева хвороба (ХПХ) - це стан, що розвивається в результаті тривалої дії іонізуючого випромінювання в малих дозах, що перевищують встановлені ліміти.

Приводить до поступових змін у різних органах і системах, особливо у крові та нервовій системі.

METROPOL (MEDical TREatment ProtocOLs for Radiation Accident Victims) - протоколи медичного лікування постраждалих від радіаційних аварій