

## ЛЕКЦІЯ

М.І. Пилипенко

ДУ Інститут медичної  
радіології ім. С.П. Григор'єва  
НАМН України, Харків

## Фізика радіології

## Physics of radiology

## 1. Види і властивості іонізвних випромінень

Іонізвнн випромінення (ІВ) — це випромінення, взаємодія яких із середовищем спричиняє іонізацію атомів і молекул. До ІВ належать фотони (гамма- та ікс-промені), елементарні частинки (альфа- і бета-частинки, електрони, позитрони, протони, нейтрони та інші елементарні частинки).

Енергія іонізвних випромінень вимірюється в електрон-вольтах (еВ, eV).

Фотони — дискретні порції (кванти) електромагнітної енергії, які можуть поводитися як хвилі чи частинки та не мають маси спокою і електричного заряду. Фотони з енергією приблизно до 2 кеВ ( $2 \times 10^3$  еВ) є фотонами оптичного діапазону електромагнітного випромінення (світлом), а при більшій енергії вони здатні іонізувати атоми середовища, отже належать до іонізввальних. Якщо енергія фотонів становить щонайменше 10 МеВ ( $10 \times 10^6$  еВ), їх взаємодія з ядром атома призводить до руйнації останнього з викидом з нього нейтрона, протона чи альфа-частинки. Цей процес носить назву «фотодезінтеграція» (рисунок 1).

Струмені фотонів залежно від походження називаються ікс-променями (ікс-випроміненням, рентгенівськими променями) чи гамма-променями (гамма-випроміненням).

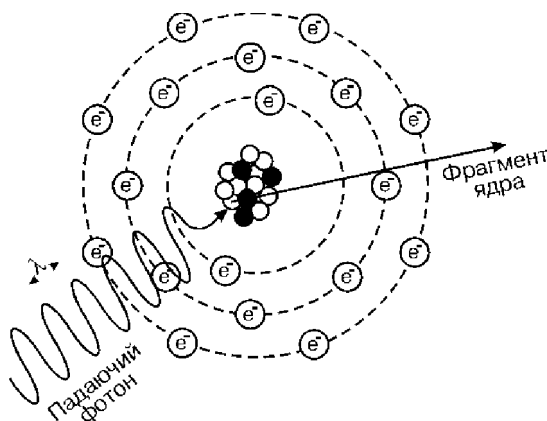


Рисунок 1. Схема процесу взаємодії фотонів надвисокої енергії з ядром атома з фотодезінтеграцією останнього

Fig. 1. Scheme of ultra-high energy photon interaction with the nucleus of an atom with photodisintegration of the latter

Ікс-промені виникають при взаємодії струменя електронів з атомами будь-якої речовини. У полі атомів електрони гальмуються, їх енергія випромінюється у вигляді квантів, що в таких випадках носять назву *гальмівного ікс-випромінення*. Енергія квантів такого випромінення становить континуум (неперервність) значень у діапазоні від мінімальної (на межі ультрафіолетових променів) до максимальної, відповідної повній кінетичній енергії електронів, що гальмуються. Отже, гальмівне ікс-випромінення має *неперервний енергетичний спектр*. Крім того, частина електронів, що падають, видаляє орбітальні електрони за межі атомів. На звільнене на внутрішній електронній оболонці атома місце переходить електрон із зовнішньої оболонки, випромінюючи при цьому частину своєї енергії у вигляді фотона ікс-випромінення. Для кожного елемента такі фотони мають свої характерні значення величини енергії, тому спектр їх енергії лінійчастий, а вони називаються *характеристичним ікс-випроміненням*.

*Гамма-випромінення* ( $\gamma$ ) — фотони ядерного походження, які виникають при радіоактивному розпаді ядер нестабільних нуклідів хімічних елементів. Зазвичай, фотони гамма-випромінення мають досить високу енергію — від десятків кеВ і вище.

*Електрон* ( $e^-$ ) — елементарна частинка оболонок атома із зарядом  $-1$  і масою спокою 511 кеВ (маса спокою частинок має певний еквівалент енергії і, відповідно, може визначатися в одиницях енергії). Електрони бувають також ядерного походження. Такі народжуються в процесі радіоактивного розпаду нестабільних ядер шляхом розпаду одного з нейтронів ядра на протон і електрон. Електрони такого походження називаються *бета-частинками* ( $\beta^-$ ). Їх кінетична енергія має характерне для даного нукліда значення.

*Позитрон* ( $e^+$ ) — елементарна частинка антиматерії із зарядом  $+1$  і масою спокою 511 кеВ. Фактично це дзеркальна до електрона частинка,

яка народжується в парі з електроном при гальмуванні фотона з енергією не менше 1,022 MeV, позаяк маса кожної з цих частинок дорівнює 511 keV. Крім того, існують позитрони ядерного походження. Ядра деяких нестабільних нуклідів розпадаються з випроміненням позитрона (так званий *позитронний бета-розпад*), який народжується в ядрі в результаті розпаду протона на нейтрон і позитрон. В такому випадку нейтрон залишається в ядрі, а позитрон випромінюється за його межі.

Оскільки позитрони — це частинки антиматерії, то в оточенні матерії вони існують тільки в русі. Коли їх кінетична енергія вичерпується в полях атомів матерії, вони зливаються з найближчим електроном, і маси обох частинок зникають, породжуючи два фотони з енергією 511 keV кожний. Цей процес має назву *анігіляція*. Анігіляційні фотони розлітаються в протилежні боки під кутом  $180^\circ$  (рисунок 2). На основі явища анігіляції розроблено ядерномедичний діагностичний метод під назвою *позитронна емісійна томографія* (ПЕТ), за допомогою якого отримують медичні молекулярні зображення.

Позитрон Електрон

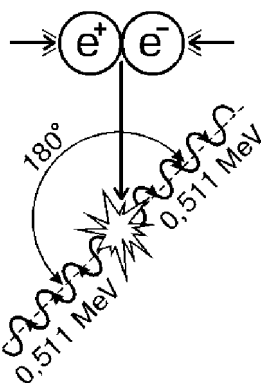


Рисунок 2. Схема процесу анігіляції пари електрон-позитрон

Fig. 2. Scheme of annihilation process of an electron-positron pair

**Протон (p)** — ядерна частинка (нуклон) із зарядом +1 і масою спокою 938 MeV.

**Нейтрон (n)** — ядерна частинка (нуклон) з нульовим зарядом і масою спокою 940 MeV.

**Альфа-частинка ( $\alpha$ )** — композитна частинка, що складається з 2 нейтронів і 2 протонів, тобто еквівалентна ядру гелію, має заряд +2 і масу 3,8 GeV ( $3,8 \times 10^{12}$  eV, або 4 атомні масові одиниці).

Проходячи через середовище, ІВ *збуджують* (викликають перехід електронів з внутрішніх

орбіт на вищі) або *іонізують* (вибивають за межі атома один чи кілька орбітальних електронів) його атоми. Збудження чи іонізація атома робить його хімічно активнішим.

Із здатністю ІВ викликати іонізацію атомів середовища пов'язані їх похідні властивості:

- викликати люмінесценцію деяких матеріалів,
- чинити фотохімічну дію («засвічувати» фотоплівку),
- ініціювати хімічні реакції,
- чинити біологічну дію.

## 2. Ослаблення і поглинання струменя ІВ.

### Типи взаємодії ІВ з матерією

Інтенсивність струменя ІВ падає пропорційно квадрату збільшення відстані від його джерела (закон обернених квадратів). Наприклад, збільшення відстані від джерела удвічі зменшує інтенсивність струменя в чотири рази (рисунок 3).

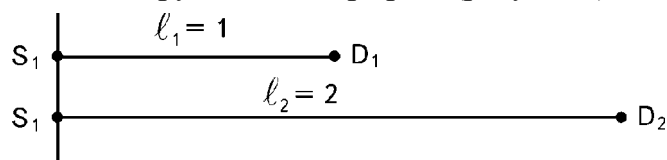


Рисунок 3. Зміна інтенсивності струменя випромінювання обернено пропорційна квадрату відстані від його джерела.  $D_1$  і  $D_2$  — інтенсивності струменя на відстані  $l_1$  і  $l_2$  від джерела, відповідно,  $l_2 = 2l_1$ ,  $D_2 = 1/4 D_1$

Fig. 3. A change of radiation beam intensity is reversely proportional to the square of the distance from its source.  $D_1$  and  $D_2$  are intensity of the beam at the distance of  $l_1$  and  $l_2$  from the source, respectively  $l_2 = 2l_1$ ,  $D_2 = 1/4 D_1$

Математично цю закономірність виражає рівняння:

$$D_2 = D_1 \times l_1^2 / l_2^2,$$

де  $D_1$  — інтенсивність струменя випромінювання на відстані від джерела  $l_1$ ;

$D_2$  — інтенсивність струменя випромінювання на відстані від джерела  $l_2$ .

Закономірність зміни інтенсивності струменя зі збільшенням відстані використовується, зазвичай, як один із важливих факторів радіологічного захисту.

На своєму шляху в речовині ІВ поступово втрачають енергію, передаючи її атомам у процесі їх іонізації і збудження. Зіткнення випромінювання з атомами носить імовірностний (статистичний) характер, тому інтенсивність струменя в речовині згасає за *експоненціальним законом*: на кожній одиниці товщини однорідної речовини (поглинач) поглинається одна і та ж сама частка випромінювання. Якщо в першій одиниці товщини шару речовини поглинеться 1% зі 100 одиниць інтенсивності

випромінення, на наступний шар залишиться 99 одиниць, із яких 1% поглинеться в цьому шарі. Продовження такого розрахунку покаже, що після проходження струменя крізь 10 одиниць товщини даної речовини залишиться 90,45 одиниць інтенсивності струменя (рисунок 4).

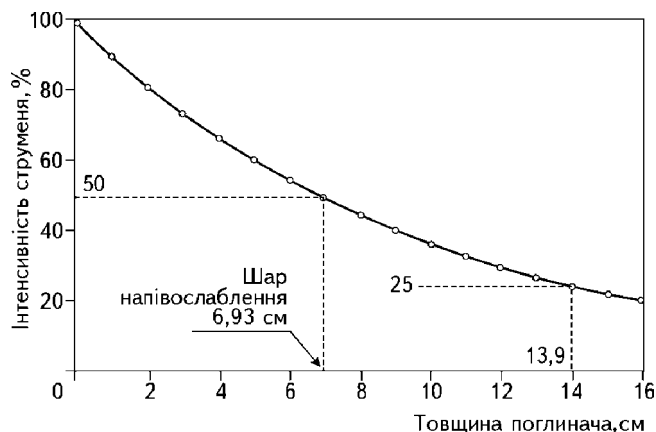


Рисунок 4. Закономірність падіння інтенсивності струменя випромінення в речовині

Fig. 4. Regularity of radiation beam intensity reduction in a substance

Цілком зрозуміло, що зі збільшенням питомої густини речовини імовірність зіткнень випромінення з атомами зростає, тобто здатність речовини ослаблювати струмінь випромінення залежить від її питомої густини. Інакше кажучи, речовина з високою питомою вагою буде ослаблювати струмінь випромінення інтенсивніше, ніж із низькою. Саме тому для захисту від радіації використовують такі матеріали, як бетон, зокрема баритобетон (бетон з вмістом нерозчинної сполуки барію — сірчанокиислої барію), свинець, збіднений уран тощо. Для кількісної характеристики ослаблювальної здатності матеріалів зазвичай використовують два показники: *лінійний коефіцієнт ослаблення* і *шар напівослаблення*.

*Лінійний коефіцієнт ослаблення* — показник ступеня відносного ослаблення струменя випромінення шаром даної речовини завтовшки 1 см.

*Шар напівослаблення* — абсолютне значення товщини шару речовини, яка забезпечує ослаблення струменя вдвічі.

Цілком зрозуміло, що значення цих показників буде різним не тільки для різних матеріалів, але і для одного і того ж самого матеріалу залежно від виду і енергії випромінення.

Для визначення ослаблювальної здатності захисного пристрою із будь-якого матеріалу використовують показник, який носить назву *свинцевий еквівалент* (в міліметрах товщини свинцю).

*Свинцевий еквівалент* — товщина шару свинцю, яка ослаблює струмінь фотонного випромінення в такій самій мірі, як і даний шар матеріалу.

Заряджені частинки іонізують атоми речовини переважно *безпосередньо* при зіткненні з ними. Такий механізм іонізації носить назву *пряма іонізація*. При проходженні частинок без заряду (нейтронів) або фотонів крізь середовище іонізація атомів відбувається переважно під дією вторинних частинок (орбітальних електронів або ядерних частинок), що вибиваються з атома при першій взаємодії незаряджених ІВ, і тому такий тип іонізації називають *непрямою іонізацією*.

Для фотонів існує 5 типів взаємодії з атомами речовини:

- когерентне (томпсонівське, класичне) розсіювання;
- комптонівське розсіювання (комптон-ефект);
- фотоелектричний ефект;
- утворення пари (або триплета) і
- фотодезінтеграція.

*Когерентне розсіювання* полягає в тому, що падаючий фотон у полі атома змінює напрямку руху (розсіюється), не втрачаючи кінетичної енергії (рисунок 5).

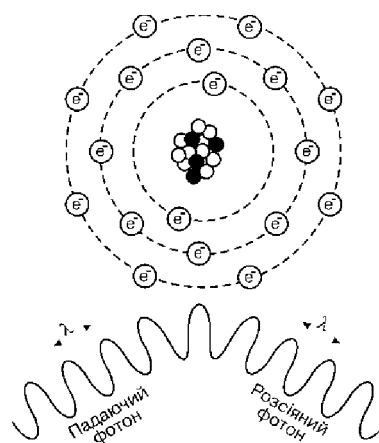


Рисунок 5. Схема когерентного (класичного) розсіювання фотонів ікс-променів на атомі речовини

Fig. 5. Scheme of coherent (classical) dispersion of x-ray photos on an atom

Зміна траєкторії руху фотона може відбутися під будь-яким кутом, аж до зворотного напрямку (*зворотне розсіювання*). В радіологічному захисті цю обставину враховують при влаштуванні робочих місць персоналу: за спиною оператора (наприклад, радіолога) на відстані менше 2 метрів не повинно бути стіни або будь-яких масивних предметів, від яких йтиме зворотно розсіяне ікс-проміння.

**Комптонівське розсіювання** — зміна напрямку руху фотона з одночасною втратою частини його енергії в результаті прямого стикання з електроном атома (рисунок 6). Внаслідок такої події електрон набуває прискорення і покидає атом, стаючи «снарядом» вторинної (непрямої) іонізації довколишніх атомів. Кут відскоку електрона до напрямку руху фотона при невеликих енергіях останнього варіює в досить широких межах (широке розсіювання), зменшуючись при збільшенні енергії падаючого фотона. При енергіях фотона понад 1 МеВ вторинні електрони практично всі рухаються вздовж траєкторії струменя фотонів, тим збільшуючи передану енергію в глибині опромінюваної речовини. В результаті поглинута енергія в поверхневих шарах речовини може бути меншою, ніж на деякій, залежно від початко-

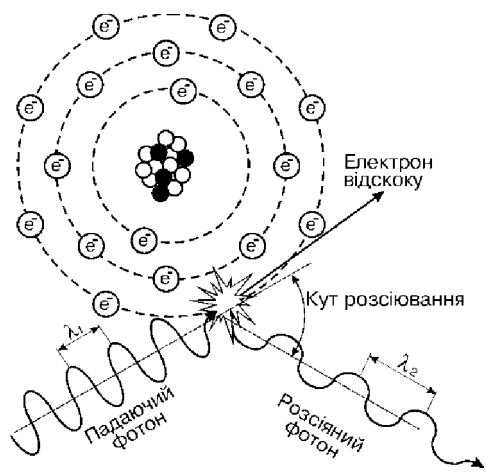


Рисунок 6. Схема комптонівського розсіювання фотонів у речовині

Fig. 6. Scheme of Compton's dispersion of photons in substance

вої енергії фотонів, глибині. Рівень найбільшої поглинутої за такої ситуації в речовині енергії носить назву *нік дози*. Крім того, зі збільшенням енергії фотонів вірогідність зворотного розсіювання випромінювання зменшується.

**Фотоелектричний ефект** — фотон при стиканні з електроном атома передає йому всю свою енергію (поглинається електроном), і електрон отримує достатню енергію, щоб покинути атом. Такий електрон носить назву *фотоелектрон* (рисунок 7). Його вакантне місце займає інший електрон з більш віддаленої електронної оболонки, випромінюючи при цьому квант характеристичного ікс-випромінювання.

**Утворення пари** — процес, при якому високоенергетичний фотон ( $E = 1,022 \text{ MeV}$ ) трансформується в пару частинок — електрон і позитрон, тобто відбувається перетворення енергії в матерію (рисунок 8).

Така подія відбувається тільки в полі атома, який відіграє в цьому процесі роль «каталізатора».

Про **фотодезінтеграцію** надвисокоенергетичним фотоном ядра атома згадано уже вище. До того треба додати, що наслідком фотодезінтеграції стає виникнення нестабільного (зазвичай, коротковічного) атома. При лікуванні онкологічних хворих мегавольтним випромінюванням лінійного прискорювача ( $E = 18\text{--}23 \text{ MeV}$ ) в їх опромінюваних тканинах утворюється дециця саме таких нестабільних надкоротковічних атомів, які майже повністю встигають розпастися протягом десятка хвилин по завершенні опромінювання.

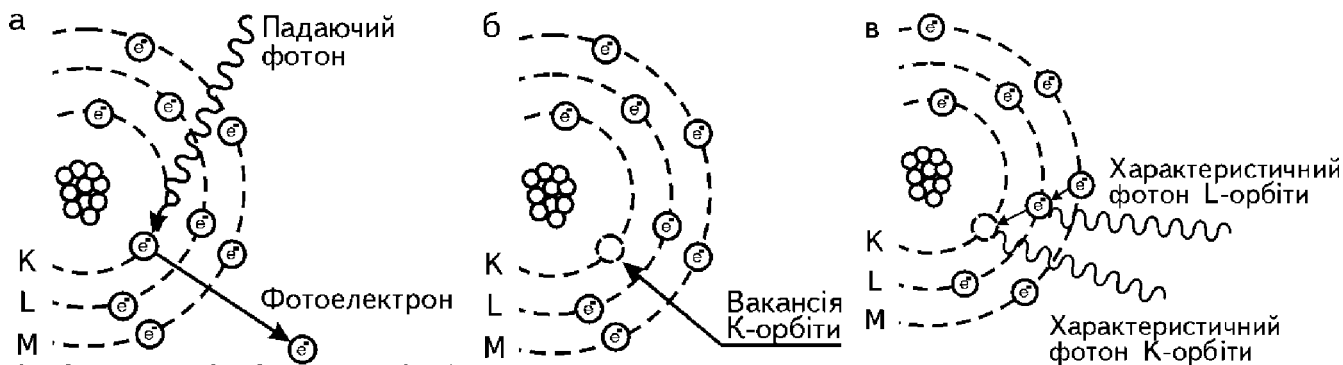


Рисунок 7. Схема послідовних етапів фотоелектричного ефекту: а — зіткнення падаючого фотона з електроном К-оболонки і викид останнього за межі атома; б — вакансія на К-оболонці; в — заповнення вакансії К-оболонки електроном з L-оболонки і випромінювання останнім фотона характеристичного ікс-випромінювання К-оболонки, і далі заповнення утвореної вакансії L-оболонки електроном з M-оболонки з випромінюванням фотона характеристичного ікс-випромінювання L-оболонки

Fig. 7. Scheme of consecutive stages of photoelectric effect: а - collision of a falling photon with an electron of K-shell and emission of the letter outside the atom; б - vacancy of K-shell; в - filling-in of the vacancy of K-shell with an electron from L-shell and radiation of characteristic x-rays of K-shell by the latter photon, and further filling in of L-shell vacancy by the electron from M-shell with radiation of photon of characteristic x-rays of L-shell

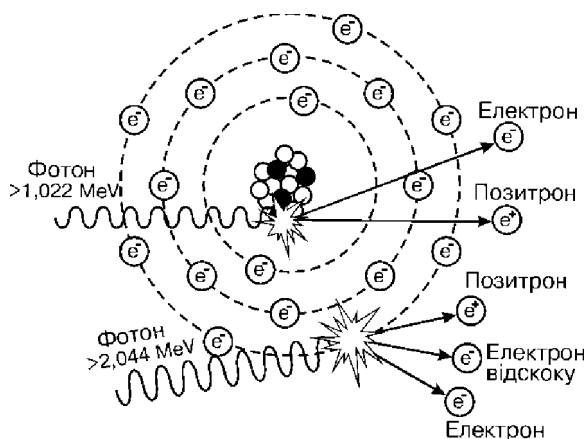


Рисунок 8. Утворення в полі атома з високоенергетичного фотона пари частинок — електрона і позитрона. Якщо така подія відбувається на орбітальному електроні, утворюється триплет, позаяк до народженої пари частинок приєднується вибитий з орбіти електрон відскоку

Fig. 8. Formation of an atom in a field from a high-energy photon and a pair of particles (electron and positron). If this event occurs on an orbit electron, triplets are formed because the detached from the orbit recoil electron joins the born pair

Частість зіткнень струменя фотонів чи частинок з атомами середовища залежить від їх маси, заряду та енергії. Вочевидь, частинки з більшою масою та електричним зарядом мають шанси частіше взаємодіяти з атомами, і тому на їх траєкторії залишаться багато іонізованих атомів на *одиницю довжини пробігу* в середовищі (рисунок 9).

У таких випадках кажуть про *високу густину іонізації*, а випромінення називають *густоіонізувальним*. До таких випромінень належать протони, нейтрони і альфа-частинки.

На противагу їм, випромінення з малим зарядом і малою масою (електрони, позитрони) і особливо без заряду і маси спокою (кванти гамма-та ікс-випромінення) спричиняють іонізацію середовища *низької густини* і тому називаються *слабкоіонізувальними*. Густину іонізації інакше називають *лінійним передаванням енергії* (ЛПЕ).

З енергією ІВ густина іонізації середовища має зворотний зв'язок — з ростом енергії іонізувальна здатність ІВ скорочується, позаяк у високоенергетичних випромінень зменшується ймовірність зіткнення з атомами.

Важливо зауважити, що з густиною іонізації прямо пов'язані фізичні, хімічні і біологічні наслідки взаємодії ІВ з опромінюваним середовищем — чим вища густина іонізації, тим значніші наслідки, що з точки зору проблем радіаційної медицини означає — *густоіонізувальні ІВ можуть становити значно більшу загрозу*.

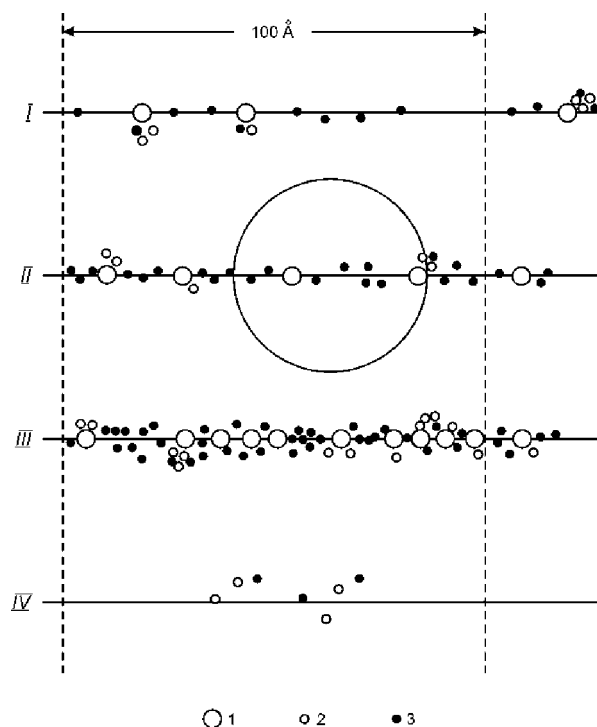


Рисунок 9. Схема відтинків траєкторії різних типів ІВ з розподілом на них актів взаємодії із атомами середовища: 1 — первинна іонізація; 2 — вторинна іонізація; 3 — збудження; I — фотон з енергією 40 кеВ; II — бета-частинка з енергією 90 кеВ; III — альфа-частинка з енергією 4 МеВ; IV — гамма-квант з енергією 1,25 МеВ

Fig. 9. Scheme of shades of trajectory of various types of IR with distribution of interaction acts with the environment atoms. 1 - primary ionization; 2 - secondary ionization; 3 - excitation; I - photon with energy of 40 keV; II - beta-particle with energy of 90 keV; III - alpha-particle with energy 4 MeV; IV - gamma-quantum with energy 1.25 MeV

*Довжина пробігу ІВ* у середовищі — середній загальний шлях, який може пройти елементарна частинка чи фотон у ньому, залежить від маси, заряду і енергії ІВ та густини середовища. Цілком зрозуміло, що високій масі і заряду ІВ відповідає коротка довжина їх пробігу. Також зрозуміло, що у середовищах високої питомої густини довжина пробігу ІВ також скорочується в міру швидкого поглинання їх енергії.

### 3. Дозиметрія

*Дозиметрія* — це галузь фізики з проблем визначення кількості та розподілу поглинутої енергії ІВ у середовищі. Основоположним у дозиметрії є поняття *доза*. Збігло чимало часу — два десятиліття — з моменту відкриття ікс-променів до формулювання вченими поняття дози в тому вигляді, який прийнято нині. У дещо спрощеному вигляді воно визначається так: *доза* — це енергія, яка передається *одиниці маси* речовини струменем випромінення.

Слід звернути увагу на те, що доза в наведеному визначенні не є кількісною характеристикою безпосередньо струменя випромінювання (для цього вживають інші міри, наприклад, *щільність струменя випромінювання*). Вона кількісно характеризує чинник, який безпосередньо відповідає за певні ефекти в опромінюваному середовищі і кількість якого, як правило, прямо пов'язана з рівнем цих ефектів. Таким чинником є енергія, що поглинається середовищем з потоку випромінювання.

Іншим важливим аспектом прийнятого визначення поняття дози є те, що за дозу приймають не всю поглинуту опромінюваною речовиною енергію, а її кількість у даній одиниці маси.

Здавалося б, у біології та медицині має сенс вважати загальну кількість енергії, поглинуту живою речовиною, тому що рівень біологічних ефектів стосовно цілісного організму вочевидь залежить саме від цієї величини. А вже зрозуміло аргіогі, що *локальне опромінювання* тварини чи людини матиме менш фатальні наслідки, ніж опромінювання *тотальне* за умови, що в обох випадках на кожен одиницю маси опромінених тканин припадає в середньому однакова енергія, тобто, інакше кажучи, дози будуть однаковими в обох випадках, а біологічні ефекти — різними. І ця обставина здається парадоксальною, зважаючи на те, що бажано було б мати таку міру дії радіації, за якою можна було б робити більш-менш точне передбачення рівня наслідків опромінювання.

Свого часу було введено поняття *інтегральна доза*, яка визначалась як *загальна кількість енергії, поглинутої всією опроміненою тканиною*. Але нині це поняття переважно має лише історичне значення з багатьох причин, головними з яких є проблема вимірювання величини інтегральної дози і залежність наслідків опромінювання біологічного об'єкта від численних інших факторів фізичної і/чи біологічної природи, частина яких навіть і досі залишається непевною.

Пряме вимірювання поглинутої енергії зі струменя проміння в живій тканині є нерозв'язною задачею, бо жива тканина з погляду фізики є системою з упорядкованими потоками енергії, рівні яких у фізіологічних умовах на багато порядків перевищують рівень тієї енергії, що поглинається тканинами навіть при летальному опромінюванні. Це відоме явище, що відмічається як парадокс біологічної дії радіації, є одним із чинників

унеможливлення прямого вимірювання енергії, доданої потоком проміння в живу тканину.

З огляду на це, пряме вимірювання дози здійснюється в певних середовищах, які називаються *дозиметричними модельними середовищами*. Як такі використовують гази, тверді тіла та рідини. Відповідно до цього *детектори* приладів, призначених для вимірювання дози — *дозиметрів*, розподіляють на *газові, твердотільні та рідинні*.

На рисунку 10 наведено принципову схему будови радіаційного дозиметра.

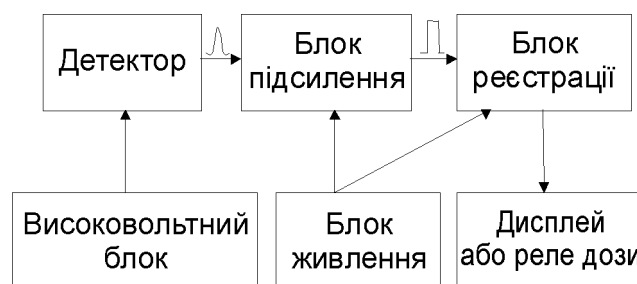


Рисунок 10. Принципова схема будови радіаційного дозиметра

Fig.10. Principal scheme of radiation dosimeter structure

Слід звернути увагу, що матеріал детектора, в якому формується пропорційний вимірюваній радіаційній дозі сигнал, і є модельним середовищем.

Визначення радіаційної дози, тобто енергії, переданої середовищу, здійснюється на основі вимірювання величини певних ефектів, які відбуваються в модельному середовищі при взаємодії ІВ з його атомами. За типом таких ефектів радіаційні детектори і, відповідно, методи дозиметрії розподіляються на:

- іонізаційні,
- сцинтиляційні,
- термолюмінесцентні (ТЛ),
- плівкові (фотоплівкові),
- теплові та
- хімічні.

В іонізаційному дозиметрі детектором слугує *іонізаційна камера* (рисунок 11), заповнена повітрям. Розміри камери, тобто об'єм повітря в ній, варіюють від кількох частин  $1 \text{ см}^3$  до  $1000 \text{ см}^3$ , що визначається необхідною чутливістю дозиметра (більший об'єм забезпечує більшу чутливість) і просторовою точністю вимірювання (малий об'єм забезпечує просторову точність). Фотони чи частинки, які входять до камери, передають енергію атомам повітря, в результаті чого останні іонізу-

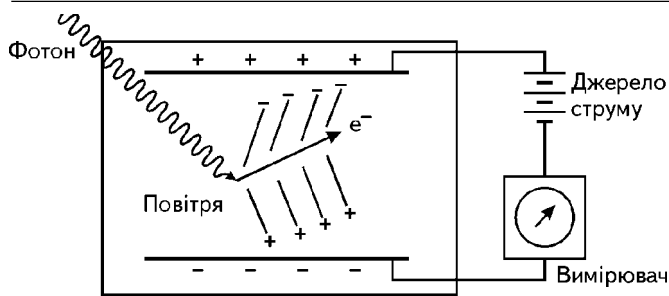


Рисунок 11. Принципова схема будови і дії іонізаційного дозиметра

Fig. 11. Principal scheme of ionization dosimeter structure and work

ються. Вільні іони рухаються до електродів камери, створюючи струм у зовнішньому електричному колі. Величина струму вимірюється спеціальним пристроєм, і за нею можна розрахувати кількість енергії, що поглинається з потоку фотонів повітрям у камері, тобто дозу в повітрі камери.

Іонізаційні дозиметри з ряду важливих причин найбільш вживані в дозиметрії, яка обслуговує потреби медичної практики.

Люмінесцентний дозиметр за детектор має сцинтилятор (монокристал NaI, спеціальні пластмаси, сцинтиляційні рідини), до якого щільно прилягає фотоелектричний помножувач (ФЕП). Енергія випромінення у сцинтиляторі перетворюється на світлові фотони, які у ФЕП збуджують електричні імпульси, що реєструються зовнішніми блоками дозиметра. Кількість імпульсів пропорційна поглинутій у сцинтиляторі енергії, тобто дозі.

Близькою за принципом до сцинтиляційної дозиметрії є термолюмінесцентна дозиметрія (ТЛД), відкрита і розроблена протягом 70-х років минулого сторіччя. Метод нині широко застосовують для оцінки рівня опромінення персоналу, калібрування радіаційного виходу терапевтичних джерел, вимірювання опромінення тіла пацієнта при рентгенодіагностиці тощо. Детектором для таких дозиметрів слугує маленька таблетка чи стовпчик (діаметром 3–10 мм) з LiF або іншого спеціального матеріалу (наприклад,  $AlO_2$ ,  $CaF_2$ ), атоми якого здатні накопичувати поглинуту енергію в електронних оболонках на тривалий час і потім віддавати її у вигляді світлового спалаху при нагріванні. Такі дозиметри дозволяють вимірювати дозу у великому діапазоні її значень, що дорівнює 8 порядкам.

Певний час у радіологічній літературі точилася дискусія відносно вживання терміна *доза* з додат-

ком *радіації* чи *опромінення*. Це пояснюється тим, що, як уже говорилося, доза є мірою кількості не безпосередньо потоку проміння, а похідної від неї — поглинутої в речовині енергії. Тому коректним є термін *доза опромінення*. Але словосполучення «доза опромінення» може викликати деякий спротив сприйняття, позаяк слово «доза» сприймається як певна кількість матерії, а «опромінення» — дія радіації. Проте коректним, а тому рекомендованим для загального вжитку, є термін *доза опромінення*, зважаючи на те, що доза опромінення має сприйматись як *кількісна міра рівня дії радіації*. До того ж це знімає ряд інших логічних недоречностей. Наприклад, як логічні сприймаються словосполучення *доза внутрішнього опромінення*, або *доза опромінення від інкорпорованих радіонуклідів*, тоді як «доза внутрішнього випромінення» позбавлене сенсу.

Радіаційна доза від фотонного випромінення, виміряна у повітрі іонізаційної камери, називається *експозиційною дозою* (*exposure* — англ.). Одиницями експозиційної дози є *рентген* (Р) — несистемна одиниця та *кулон на кілограм* (К/кг) — системна одиниця (СІ).

Експозиційна доза, отримана за одиницю часу, носить назву *потужність експозиційної дози* (ПЕД) і вимірюється в *рентгенах на секунду* (Р/с), *рентгенах на хвилину* (Р/хв) або *рентгенах на годину* (Р/год).

Для визначення поглинутої енергії зі струменя будь-яким іншим ніж повітря середовищем, зокрема тканинами організму, вживається поняття *поглинутої дози*.

*Поглинута (абсорбована) доза* — це кількість енергії випромінення, поглинута в одиниці маси будь-якої речовини:

$$D = E/M,$$

де

D — поглинута доза;

E — поглинута сумарна кількість енергії;

M — маса опроміненої речовини.

Поглинута доза у даній точці речовини розраховується за формулою

$$D = f \times X,$$

де

f — Ф-фактор;

X — експозиційна доза.

Ф-фактор — це коефіцієнт відношення експозиційної та абсорбованої доз, залежний від енергії

випромінення та густини опромінюваного середовища. Із одного й того ж самого струменя випромінення середовище з більшою густиною поглинає енергію більшу, ніж середовище меншої густини. Так, кістки поглинуть більшу дозу, ніж м'язи, а останні — ніж жирова тканина ( $\Phi$ -фактор для фотонів з енергією 50 кеВ в цих середовищах становить 3,60; 0,94 і 0,66, відповідно).

Але величина абсорбованої дози не завжди може бути мірою очікуваного біологічного ефекту. Справа в тому, що різні типи випромінень, як уже зазначалося, мають неоднаковий характер розподілу актив іонізації атомів в об'ємі тканини, або різну лінійну передачу енергії (ЛПЕ). Важкі частинки з великим зарядом (наприклад, альфа-частинки) на своєму шляху в тканині іонізують атоми густо, і це спричиняється до їх більшої біологічної ефективності (більшої уражучої дії) при однаковій переданій енергії на одиницю об'єму тканини, тобто при однаковій поглинутій дозі. З метою урахування цього феномену введено поняття *еквівалентної дози* (H):

$$H = D \times Q_F,$$

де

D — поглинута доза,

$Q_F$  — фактор якості випромінення.

*Фактор якості випромінення* ( $Q_F$ ) — кількісна характеристика кожного типу випромінення за густиною іонізації середовища. Еквівалентна доза вже є не реальною фізичною величиною, а, деякою мірою, абстрактним показником (коефіцієнтом), призначеним кількісно оцінити біологічні ризики дії різних типів випромінення.

Але і введення поняття еквівалентної дози не розв'язало всіх проблем, пов'язаних з необхідністю мати універсальну міру ризиків опромінення людини за різних умов. Цей виклик практики радіаційного захисту людини був розв'язаний уведенням поняття *ефективної дози*.

*Ефективна доза* — це сума добутків еквівалентних доз ( $H_T$ ) в окремих органах і тканинах на *тканинні зв'язувальні фактори* ( $W_T$ ).

$$E = \sum (H_T \times W_T).$$

*Органний чи тканинний зв'язувальний фактор* ( $W_T$ ) встановлює вклад ризику певного ефекту від опромінення даного органа чи тканини до загального ризику при нерівномірному опроміненні тіла. Значення  $W_T$  для тканин і органів визначено з експериментів та з теоретичних міркувань.

*Ефективна доза* — це абстракція, але її практична привабливість полягає у можливості визначити ймовірний сумарний ризик від опромінення різних ділянок тіла за різних поглинутих доз у періоди часу, навіть значно віддалені один від одного. Значення ефективних доз підсумковуються для однієї людини протягом всього життя і ця сумарна величина приймається за показник *накопичуваного ризику опромінення*.

Для оцінки негативної значущості дозного навантаження на всю популяцію людей введено поняття *колективної ефективної дози* ( $E_p$ ), яка визначається як сума всіх ефективних доз, одержаних опроміненими особами в популяції:

$$E_p = \sum E.$$

Таким чином, нині маємо у вжитку *такі міри* радіаційного опромінення:

- експозиційна доза (exposure),
- поглинута (абсорбована) доза (absorbed dose),
- еквівалентна доза (dose equivalent),
- ефективна доза (effective dose),
- колективна ефективна доза (collective effective dose).

Для визначення величини цих доз використовують одиниці:

- для експозиційної дози — *кулон на кілограм* (К/кг) (coulomb per kilogram (C/kg)) і *рентген* (R) (roentgen (R)),
- для поглинутої дози — *рад* (rad) і *грей* (Гр) (gray (Gy)),
- для еквівалентної дози — *бер* (ber) і *зіверт* (Зв) (sievert (Sv))
- для ефективної дози — *зіверт* (Зв) (sievert (Sv)) і
- для колективної дози — *людино-зіверт* (люд-Зв).

Назва одиниці «рад» є акронімом від «радіаційна абсорбована доза». Її величина дорівнює 100 ергам енергії, поглинутої в 1 грамі речовини. Аналогічне походження назви одиниці «бер» — «біологічний еквівалент рентгена».

Співвідношення значень одиниць дози таке:

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад} \quad 1 \text{ рад} = 10 \text{ мГр} = 1 \text{ сГр}.$$

Для фотонного випромінення з високою енергією для практичних потреб можна приймати співвідношення:  $1 \text{ Р} \sim 1 \text{ бер} \sim 1 \text{ рад} \sim 1 \text{ сГр}$ .

#### 4. Радіоактивність

Явище випромінювання ураном випромінення, подібного до ікс-променів, відкритих за рік до того Вільгельмом К. Рентгеном, встановив А. Беккерель у 1896 р. За пропозиції М. Склодов-



ської-Кюрі, яка разом з А. Беккерелем досліджувала це явище, воно було назване *радіоактивність*. Згодом були відкриті й інші природні *радіоактивні* хімічні елементи, а 1934 р. донька М. Склодовської-Кюрі Ірен Жоліо-Кюрі разом з чоловіком Фредеріком Жоліо-Кюрі встановили можливість отримувати радіоактивні елементи штучно — явище, назване *штучною радіоактивністю*.

Як відомо, ядро атома складається з елементарних частинок із загальною назвою *нуклони* (рисунок 12). До них відносять позитивно заряджені протони (маса 1 і заряд +1) і *нейтрони* (маса 1 і заряд 0). Кількість протонів і нейтронів у ядрі становить його масу. Загальна кількість протонів визначає сумарний електричний заряд ядра і зумовлює фізико-хімічні особливості елемента. Для кожного елемента характерна тільки певна кількість протонів у ядрах його атомів. Зміна їх кількості в ядрі означає, що воно стало ядром атома іншого елемента. Зміна ж кількості нейтронів у ядрі змінює лише його масу, не спричиняючи зміни його приналежності даному елементу. Такі варіанти ядра атома хімічного елемента з різною кількістю нейтронів отримали назву його *ізоотопів* (*однаковомісних*), оскільки являють один і той самий елемент і тому розташовані в періодичній таблиці хімічних елементів в одній позиції. Окремий ізоотоп елемента називається *нуклід*, але ці два терміни зазвичай вживають і як синоніми.

### Ядро ${}^4_2\text{He}$



**2 нейтрони**  
**2 протони**  
**маса = 4**  
**заряд = +2**

Рисунок 12. Фізичні характеристики нуклонів — протонів і нейтронів

Fig. 12. Physical characteristics of nuclons – protons and neutrons

Як приклад у таблиці 1 наведено ізотопи водню (H) з масами ядра в 1, 2 і 3 одиниці. Перший ізоотоп має назву *протій* (protium — *простий* (лат.)). Це найпоширеніший у природі (й усьому Всесвіті) ізоотоп водню, ядро якого складається лише з 1 протона (нейтрони відсутні), тому його маса становить 1 і заряд +1. Другий ізоотоп — *дей-*

*терій* (deuterium — *другий*) з атомною масою 2. У цього ізотопа ядро складається з 1 протона і 1 нейтрона. Таке ядро енергетично стабільне, як і у протія, тому ці два ізотопи називаються *стабільними*. Дейтерій входить до складу молекули *важкої води* замість протія. Останній — третій ізоотоп (tritium — *третій*) має атомну масу 3 (в ядрі — 1 протон і 2 нейтрони). Ядро з двома нейтронами і одним протоном енергетично *нестабільне*, з часом воно розпадається з випромінюванням бета-частинки. Такі нукліди називають *радіоактивними*. Усі три ізотопи водню мають природне походження.

Таблиця 1

Ізотопи водню  
Hydrogen isotopes

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| ..... | ..... | ..... | ..... | .. .. |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |
| ..... | ..... | ..... | ..... | ..... |

На відміну від водню, більшість елементів мають лише один природний ізоотоп, як наприклад, фосфор ( ${}^{31}\text{P}$ ). Усі його інші ізотопи (рисунок 13), зокрема з масою ядра 30 ( ${}^{30}\text{P}$ ) і 32 ( ${}^{32}\text{P}$ ), — штучного походження.

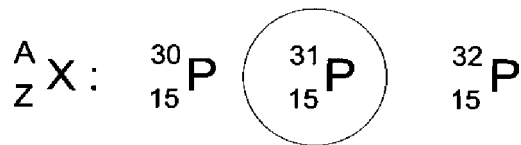


Рисунок 13. Ізотопи фосфору: ізоотоп з атомною масою 31 ( ${}^{31}\text{P}$ ) — природний, два інших  ${}^{30}\text{P}$  і  ${}^{32}\text{P}$  — штучні. Форма запису ізоотопів: X — символ елемента, A — атомна маса, Z — заряд ядра (номер елемента в періодичній таблиці елементів)

Fig. 13. Phosphorus isotopes: isotope with atomic mass 31 ( ${}^{31}\text{P}$ ) is natural, two other  ${}^{30}\text{P}$  and  ${}^{32}\text{P}$  are artificial. Isotope signature: X the element symbol. A - atomic mass. Z- nucleus charge (the number of the element in the periodical system)

Нині відомо для всіх елементів загалом понад 2000 радіоактивних нуклідів, з яких приблизно 300 — природні.

Найбільш поширеними природними радіонуклідами, які вносять найбільший вклад у неантропогенне опромінення людей, є вуглець-14, калій-40, радон-222, радій-226, уран-235, уран-238 і торій-232 (рисунок 14).

Вуглець-14 постійно синтезується в атмосфері під дією космічних променів зі стабільного нукліда  ${}^{16}\text{C}$  і надходить у процесі обміну речовин в рослини, а далі з рослинною їжею — до організму лю-

## Природні радіонукліди

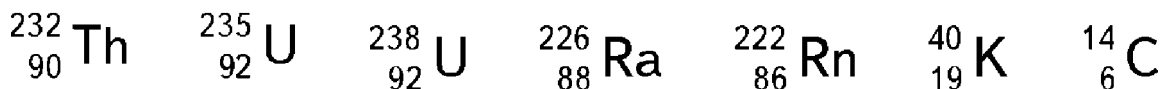


Рисунок 14. Найбільш поширені природні радіонукліди  
Fig. 14. The most common natural isotopes

дини. Цей нуклід вносить до 15% її природного внутрішнього опромінення. У біологічних об'єктах, допоки в них підтримується обмін речовин, ці два ізотопи вуглецю перебувають у рівноважному співвідношенні. Після вмирання організмів радіовуглець-14 розпадається без поповнення, і співвідношення поступово порушується все більше і більше, що дає можливість, вимірюючи ступінь цього порушення, встановити час смерті рослин та тварин чи стародавність матеріалів рослинного і тваринного походження з археологічних знахідок.

Калій-40 виник разом з речовиною, з якої формувалася наша планета, і зберігся донині, позаяк середній вік його атомів становить близько 1,8 млрд років. Нуклід рівномірно розсіяний серед інших ізотопів калію, зокрема і в організмі людей. Внесок у внутрішнє природне опромінення людини від нього становить близько 80% від усього внутрішнього природного опромінення. Інші природні радіонукліди роблять внесок головним чином у зовнішнє природне опромінення (вклад у так званий *природний радіаційний фон*).

Ядра атомів радіоактивних ізотопів енергетично нестабільні, тобто розпадаються з випромінюванням енергії у вигляді гамма-квантів та/або викидом альфа- чи бета-частинок. Кожному радіоізоотопу властивий певний тип розпаду, що відбувається за характерної схеми.

**Альфа-розпад.** Ядро випромінює альфа-частинку (2 протони і 2 нейтрони, заряд +2, маса 4), перетворюючись на ядро іншого елемента (*дочірнього*), розташованого в періодичній таблиці елементів на 2 позиції лівіше («зсув уліво»), оскільки його заряд нижчий на 2 одиниці, ніж у материнського ядра. Крім частинки при цьому додатково може випромінюватися і гамма-квант. Класичним прикладом такого типу радіоактивного розпаду може бути розпад радіонукліда радію-226 (рисунки 15 і 16).

**Бета-розпад.** Є два варіанти бета розпаду — *електронний* і *позитронний*. У першому варіанті



Рисунок 15. Принципова схема альфа-розпаду  ${}^{226}\text{Ra}$ . Ядро радіонукліда при розпаді випромінює альфа-частинку (маса 4 і заряд +2), в результаті чого утворюється ядро нового елемента  ${}^{222}\text{Rn}$

Fig. 15. Principal scheme of alpha decay of  ${}^{226}\text{Ra}$ . The nucleus of this radionuclide radiates an alpha-particle (mass 4 and charge +2) resulting in formation of a new element,  ${}^{222}\text{Rn}$

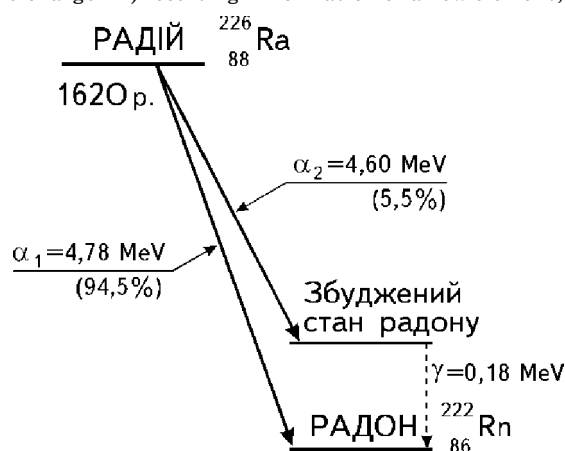


Рисунок 16. Схема фізичних процесів при розпаді  ${}^{226}\text{Ra}$ : 94,5% ядер цього радіонукліда при розпаді випромінюють тільки альфа-частинку з енергією 4,78 MeV, інші 5,5% ядер — альфа-частинку з енергією 4,60 MeV і потім — гамма-квант з енергією 0,18 MeV

Fig. 16. Scheme of physical processes at decay of  ${}^{226}\text{Ra}$ : 94.5% of nuclei of this radionuclide radiate only alpha-particle with energy 4.78 MeV, the rest 5.5% of nuclei - alpha-particle with energy 4.60 MeV and later gamma-quantum with energy 0.18 MeV

ядро випромінює тільки електрон або додатково і гамма-квант. Електрон у ядрі виникає в результаті розпаду одного з нейтронів на протон, який залишається в ядрі, і випромінюваний електрон (*електронний бета-розпад*), в результаті чого створюється дочірній елемент із зарядом ядра на одиницю більшим, тому він стоїть у періодичній таблиці елементів на 1 клітину правіше («зсув управо») (рисунки 17).

На протилежність цьому, в іншому варіанті бета-розпаду в ядрі один з протонів розпадається на випромінюваний позитрон (*позитронний бета-розпад*) і нейтрон, що залишається в ядрі. Ядро втрачає одиницю заряду, і тому дочірній елемент має позицію на одну клітину лівіше (рисунки 18).

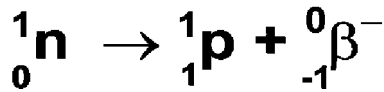
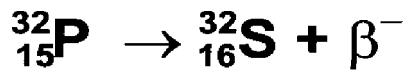


Рисунок 17. Принципова схема електронного бета-розпаду. Ядро радіонукліда фосфору-32 випромінює бета-частинку із зарядом  $-1$  (електрон), який утворюється в результаті розпаду одного з нейтронів на дві заряджені частинки — протон, який залишається в ядрі, і випромінюваний електрон. Як результат, заряд ядра збільшується на одиницю, і фосфор перетворюється на сірку

Fig. 17. Principal scheme of electron beta-decay. The nucleus of the radionuclide of phosphorus 32 radiates a beta-particle with the charge  $-1$  (electron) which is formed as a result of decay of one of neutrons into two charged particles, proton (which remains in the nucleus) and radiated electron. As a result, the charge of the nucleus increases by 1 and phosphorus transforms into sulfur

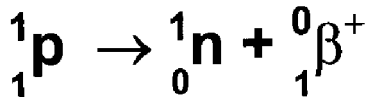


Рисунок 18. Принципова схема позитронного варіанту бета-розпаду. Ядро радіонукліда фосфору-30 випромінює бета-частинку із зарядом  $+1$  (позитрон), який утворюється в результаті перетворення одного з протонів у дві частинки — нейтрон, який залишається в ядрі, і випромінюваний позитрон. Як результат, заряд ядра зменшується на одиницю, і фосфор перетворюється на кремній

Fig. 18. Principal scheme of positron variant of beta-decay. The nucleus of the radionuclide of phosphorus-30 radiates a beta-particle with the charge  $+1$  (positron) which is formed as a result of transformation of one of the protons into two particles, neutron (remains in the nucleus) and radiated positron. As a result, the charge of the nucleus reduces by 1 and phosphorus transforms into silicon

У деяких випадках бета-розпаду після випромінювання електрона чи позитрона ядро дочірнього радіонукліда залишається в енергетично збудженому — *метастабільному* — стані і тільки через деякий час (інколи досить значний) переходить у стабільний, випромінювши надлишок енергії у вигляді гамма-кванта. Радіоізотопи, ядра яких після випромінювання бета-частинки продовжують перебувати в збудженому стані, називаються метастабільними (рисунок 19).

На рисунку 20 наведено схеми фізичних процесів у ядрах при різних типах бета-розпаду.

**К-захват.** При цьому типі розпаду ядро набуває стабільності в результаті поглинання ним електрона з К-орбіти (найближчої до ядра). Захоплений ядром електрон з'єднується з протоном, утворюючи нейтрон. Як результат, заряд ядра зменшується на одиницю, і материнський радіонуклід перетворюється на новий зі зміщен-

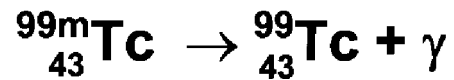


Рисунок 19. Принципова схема бета-розпаду з утворенням проміжного радіонукліда в метастабільному стані. Ядро радіонукліда молибдену-99 випромінює бета-частинку із зарядом  $-1$  (електрон) з перетворенням на радіонуклід технецію-99m, ядро якого залишається значний час у збудженому (з надлишком енергії) стані. Такий стан ядра носить назву метастабільного. В подальшому залишок енергії ядра випромінюється у вигляді тільки гамма-кванта, і метастабільний радіонуклід технецію перетворюється на стабільний нуклід ( ${}^{99}\text{Tc}$ )

Fig. 19. Principal scheme of beta-decay with formation of an intermediate radionuclide in an unstable state. The nucleus of radionuclide of molybdenum-99 radiates a beta-particle with the charge  $-1$  (electron) with transformation into technetium-99m radionuclide, its nucleus remains excited for a long time (with energy excess). This state is called metastable. Later the excess of energy of the nucleus is radiated as gamma-quantum and metastable radionuclide of technetium transforms into stable nuclide ( ${}^{99}\text{Tc}$ )

ням у таблиці елементів вліво. При такому варіанті ядро не випромінює енергії. Місце захопленого з К-оболонки електрона займає інший із зовнішньої орбіти, що супроводжується випромінюванням кванта енергії — фотона *характеристичного ікс-проміння* (рисунок 21). Отже, радіонукліди такого типу розпаду випромінюють тільки фотонне випромінювання (як і метастабільні), і тому становлять значний інтерес для використання в радіонуклідній діагностиці, тому що забезпечують пацієнтові дози опромінення низького рівня.

Зазвичай за швидкістю розпаду радіоізотопи класифікують на *надкоротковічні*, *коротковічні* і *довговічні*. Для радіонуклідної діагностики використовують перші два типи —  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{125}\text{I}$ ,  ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  ${}^{201}\text{Tl}$ ,  ${}^{32}\text{P}$ ,  ${}^{198}\text{Au}$ ,  ${}^{18}\text{F}$ . Для гамма-радіотерапії, зазвичай, застосовують гамма-випромінювальні радіонукліди  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{192}\text{Ir}$ . Радіонукліди кобальт-60 і цезій-137 знаходять застосування також у багатьох технологічних процесах у промисловості.

Акт розпаду ядра радіоізопопа є ймовірнісним явищем, тому кількість радіоізопопа з часом рівномірно зменшується за *експоненціальним законом*: в рівні інтервали часу розпадаються *рівні частини* абсолютної кількості ядер, що була на початку такого інтервалу. Інакше кажучи, відносна кількість розпадів ядер радіонукліда за одиницю часу залишається постійною, незважаючи на убування кількості ядер з часом у результаті їх розпаду (рисунок 22). Ця закономірність носить назву *закон радіоактивного розпаду*.

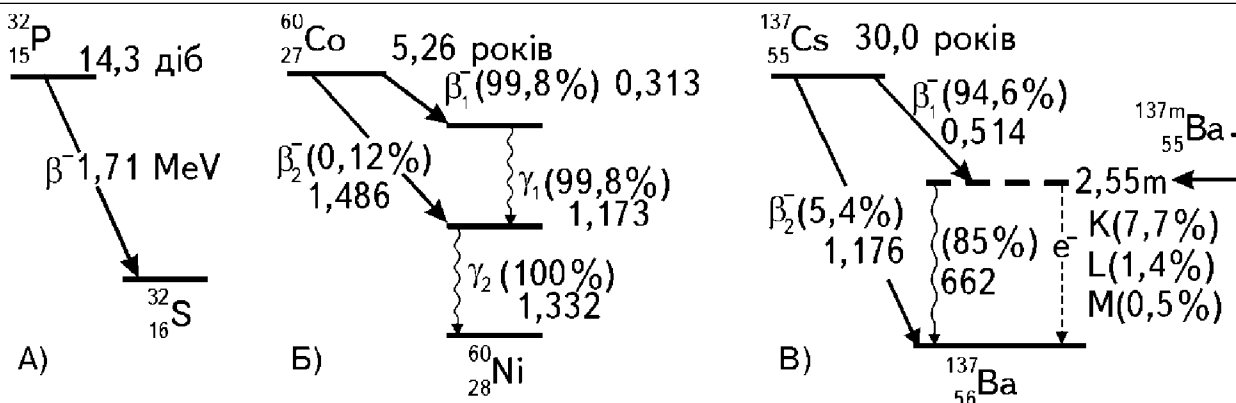


Рисунок 20. Схеми фізичних процесів при бета-розпаді: А — ядро радіонукліда  $^{32}\text{P}$  при розпаді випромінює тільки електрон з енергією 1,71 MeВ, перетворюючись зразу на стабільний нуклід сірки; Б — 0,12 % ядер радіонукліда  $^{60}\text{Co}$  при розпаді випромінюють електрон з енергією 1,47 MeВ і гамма-квант з енергією 1,332 MeВ, перетворюючись на стабільний нуклід нікелю. Інші 99,8 % ядер випромінюють електрон з енергією лише 0,31 MeВ і послідовно 2 гамма-кванта з енергією 1,17 MeВ і 1,33 MeВ; В — 5,4 % ядер радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$  випромінює електрон з енергією 1,18 MeВ, перетворюючись зразу на стабільний нуклід барію. Інші 94,6 % ядер випромінюють послідовно електрон з енергією 0,514 MeВ і гамма-квант з енергією 0,662 MeВ

Fig. 20. Scheme of physical processes at beta-decay: А - nucleus of  $^{32}\text{P}$  at decay radiates only electron with energy 1.71 MeV transforming into a stable sulfur nuclide; Б - 0.12% of  $^{60}\text{Co}$  nuclei radiate electron with energy 1.47 MeV and gamma-quantum with energy 1.332 MeV, transforming into stable nickel nuclide. The rest 99.8% nuclei radiate electron with energy 0.31 MeV and consequently 2 gamma-quantums with energy 1.17 MeV and 1.33 MeV; В - 5.4% of nuclei of  $^{137}\text{Cs}$  radiate electron with energy 1.18 MeV transforming into a stable barium nuclide. The rest 94.6% of nuclei radiate consequently an electron with energy 0.514 MeV and gamma-quantum with energy 0.662 MeV

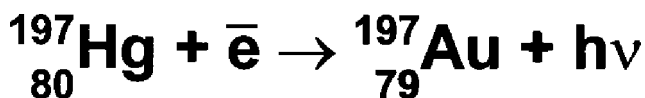


Рисунок 21. Схеми радіоактивного розпаду ядра за типом К-захоплення. Ядро радіонукліда ртуті-197 захоплює електрон з К-орбіти (найближчої до ядра). Захоплений ядром електрон з'єднується з протоном, утворюючи нейтрон. Як результат, заряд ядра зменшується на одиницю, і ртуть перетворюється на золото

Fig. 21. Scheme of radioactive decay of a nucleus of K-capture type. The nucleus of mercury-197 radionuclide captures electron from K-orbit (the closest to the nucleus). The captured electron joins with proton forming neutron. As a result, the charge of the nucleus reduces by 1 and mercury turns into gold

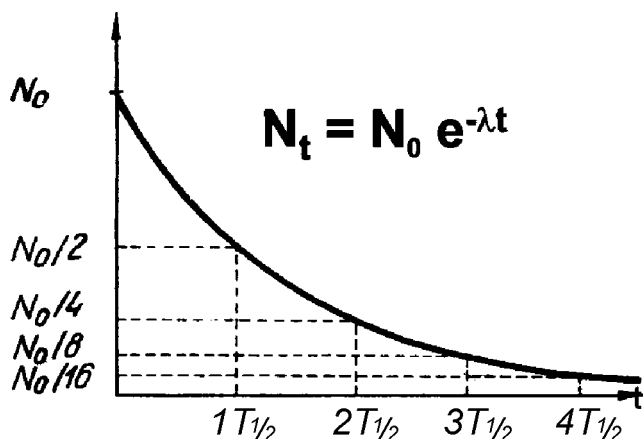


Рисунок 22. Закон радіоактивного розпаду.  $N_0$  — початкова кількість радіонукліда,  $N_t$  — залишок радіонукліда через проміжок часу  $t$ ;  $T_{1/2}$  — час напіврозпаду радіонукліда,  $e$  — основа натурального логарифма;  $\lambda$  — стала розпаду

Fig. 22. Law of radioactive decay.  $N_0$  - initial amount of radionuclide,  $N_t$  - remaining radionuclide after  $t$  time;  $T_{1/2}$  - time of half-decay of radionuclide,  $e$  - base of natural logarithm;  $\lambda$  - decay constant

Кожний радіонуклід має свою характерну швидкість розпаду ядер, мірами якої є *період напіврозпаду* ( $T_{1/2}$ ) і *стала розпаду* ( $\lambda$ ).

*Період напіврозпаду* ( $T_{1/2}$ ) — це час розпаду половини початкової кількості ядер. *Стала розпаду* ( $\lambda$ ) — відносна частина ядер радіонукліда, яка розпадається за кожну одиницю часу. Співвідношення цих критеріїв математично виражається такими рівняннями:

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda, \quad \lambda = 0,693/T_{1/2}$$

Крім того, інколи вживається такий критерій, як *середній час життя ядер радіонукліда*  $\Theta$ , який визначають за таким співвідношенням:

$$\Theta = 1,44 \times T_{1/2}$$

## 5. Радіометрія

Оскільки абсолютна кількість розпадів ядер за одиницю часу строго пропорційна наявній у даний момент кількості, і, отже, з часом зменшується пропорційно до зменшення кількості радіоізопа від неперервного його розпаду, за *міру кількості радіонукліда* прийнято величину, яка називається *активністю* (не плутати з «радіоактивністю») і яка становить *абсолютну кількість розпадів ядер у даному зразку за одиницю часу*.

Одиницями активності є *беккерель* (Becquerel) — Бк (Bq) та *кюрі* (Curie) — Кі (Ci).

1 *беккерель* — кількість радіонукліда, в якій розпадається 1 ядро за секунду (1 розп/с).

1 *кюрі* — кількість радіонукліда, в якій розпадається  $3,7 \times 10^{10}$  ядер за секунду ( $3,7 \times 10^{10}$  розп/с).

У медичній практиці користуються похідними одиницями:  $kBк = 10^3 Bк$ ;  $MBк = 10^6 Bк$ ;  $mKi = 10^{-3} Ki$ ;  $mkKi = 10^{-6} Ki$ .

Для вимірювання кількості радіонукліда застосовують прилади, які мають узагальнену назву — *радіометри* (рисунок 23). В ідеалі, задачею радіометра є вимірювання активності зразка радіонукліда, тобто підрахунок кількості розпадів його ядер в одиницю часу. Оскільки при розпаді ядра радіонукліда випромінюється фотон чи елементарна частинка, їх підрахунок і стає шляхом підрахунку кількості розпадів, тобто визначення активності певного зразка нукліда. Отже, детектором у радіометра має бути пристрій, здатний створити сигнал на виході на ознаку попадання в його об'єм фотона чи частинки. Такі пристрої носять назву *лічильників випромінювання*. На їх виході створюється електричний імпульс, або просто *імпульс* на ознаку попадання в нього фотона чи частинки. Найуживанішими лічильниками випромінень є *сцинтиляційні*.

Зрозуміло, що лічильник реєструє лише части-

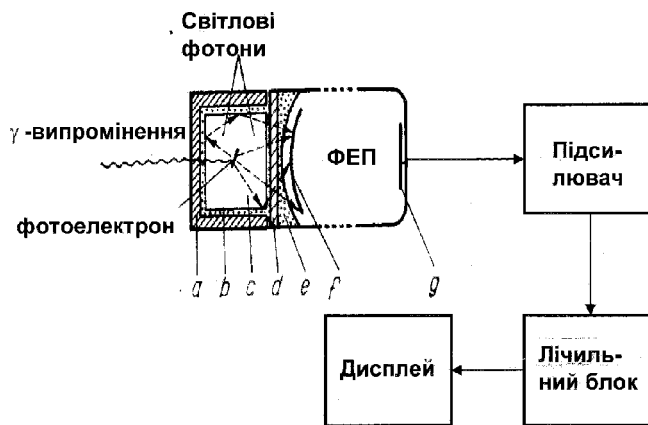


Рисунок 23. Принципова схема сцинтиляційного радіометра

Fig. 23. Principal scheme of scintillation dosimeter

ну випромінень, які виникають при розпаді ядер радіонукліда, позаяк випромінення розподілені у сферичному об'ємі, в якому лічильник займає лише невелику частину. Ця обставина вимагає при вимірюваннях активності різних зразків радіонукліда суворо дотримуватися збереження сталості геометричних умов вимірювання. Але і з числа частинок, що потрапили до об'єму лічильника, з різних причин (фізичних і статистичних) і за цих умов також буде зареєстрована лише їх частина, величина якої визначає *ефективність лічильника*.

Та у практичній діяльності всі діагностичні задачі ядерної медицини і радіаційної гігієни розв'язуються, як правило, за допомогою вимірювання *відносної активності* радіонукліда, під якою розуміють відношення кількості імпульсів, зареєстрованих в однаковий час у різних частинах простору (зокрема в різних пробах біологічних середовищ чи над різними ділянками тіла) чи у різні моменти часу над тією ж самою анатомічною ділянкою (органом) тіла досліджуваного. Також наявність забруднення радіонуклідами середовища (предметів, поверхонь, устаткування) і його відносний ступінь орієнтовно можна оцінювати кількістю зареєстрованих радіометром імпульсів за одиницю часу або ж у певний його проміжок.

## 6. Природний радіаційний фон

Протягом усієї своєї історії становлення та існування все живе на Землі зазнає неперервного опромінювання від природних джерел ІВ — космічних променів, випромінювання земної кори і природних радіонуклідів, що містяться в організмі. Узагальнено цей повсюдний і всепроникний потік ІВ називається *природний радіаційний фон (ПРФ)*.

*Космічні промені* — це заряджені елементарні частинки надвисокої енергії (до  $10^{18}$  eV) із міжзоряного простору. До їх складу входять протони, альфа-частинки і ядра легких елементів. Стикаючись з молекулами земної атмосфери первинні космічні промені створюють зливу вторинних і третинних випромінень, кількість яких зростає в атмосфері до висоти 20–16 км, після чого потік їх слабшає через поглинання атмосферою. На рівні моря космічні промені створюють дозу опромінення в середньому у 300 мкЗв на рік (0,4 мЗв/рік), а в горах — у кілька разів вищу (на рівні високих вершин — до 4500 мкЗв/рік). За один рейс між Парижем і Нью-Йорком кожний пасажир літака отримує дозу в 50 мкЗв (політ 7,5 години на висоті 10–11 км). Загальна ж доза опромінення людства, зумовлювана повітряними подорожами, становить колективну дозу приблизно у 2000 люд-Зв на рік.

*Випромінювання земної кори* складається з гамма-променів радіоактивних елементів — урану-235, урану-238, торію-232 і продуктів їх розпаду, зокрема радію-226, радію-224, рубідію-87. Це джерело зовнішнього опромінювання людини. Доза

зовнішнього опромінення людини від земного випромінення становить 300 — 600 мкЗв/рік (в середньому 0,5 мЗв/рік), але 3 % населення Землі живе в регіонах з рівнем опромінення 1000 мкЗв/рік, а 1,5 % — до 1400 мкЗв/рік і навіть вище. У Бразилії на березі Атлантики є курортне містечко Гуарапарі, населення якого становить близько 12 тисяч чоловік, з пляжами із кварцового піску, на яких щорічно відпочиває приблизно 30 000 осіб. На окремих ділянках тих багатих на торій пляжів радіація сягає 175000 мкЗв/рік, а на вулицях міста — 8000–15000 мкЗв/рік. В Індії у штаті Керала на вузькій смузі узбережжя, що простяглася на 55 км, живе приблизно 70 тисяч населення. Обстеження показали, що середня доза на цій території становить 3800 мкЗв/рік, а окремі жителі отримують навіть дозу до 17000 мкЗв/рік, що в 50 разів перевищує середню дозу по земній кулі. Є й інші місця на Землі зі значно підвищеним радіаційним фоном від ІВ ґрунтів.

У бетоні й цеглі, які виготовляють з використанням мінеральної сировини (пісок, цемент, щебінь), зазвичай, вміст радіоактивності підвищений (в деяких щаблях — у десятки разів), тому в будинках з таких матеріалів радіаційний фон, зрозуміло, підвищений порівняно з будівлями з деревини. В них значно підвищена також концентрація радону.

Продуктом розпаду радію-226 є радіоактивний газ альфа-випромінювач радон-222, який має період напіврозпаду 3,7 доби і тому може просочуватися крізь тріщини із глибин земних порід на поверхню і далі переходити в атмосферу. З повітрям радон-222 надходить у легені людини, створюючи її інгаляційне опромінення. Крім того, при розпаді цей нуклід перетворюється в RaD, твердий продукт, який відкладається в тканинах легень і, в свою чергу, повільно перетворюється в полоній, теж твердий продукт і теж альфа-випромінювач. Отже, радон-222 є джерелом серйозного ризику виникнення радіоіндукованого раку легень.

Іншим важливим джерелом інгаляційного опромінення є вуглець C-14, бета-випромінювач атмосферного походження.

Опромінення людини від внутрішніх природних джерел зазвичай становить 20% від загальної дози на м'які тканини від природного радіаційно-

го фону. Головним джерелом природного внутрішнього опромінювання є радіонуклід земного походження калій-40, що надходить до організму з харчами.

За оцінками Наукового Комітету з дії атомної радіації (НКДАР) ООН (2001) складові природного радіаційного фону, варіації дозі середні дози опромінення населення Землі від них такі (мЗв/рік):

- космічне проміння (0,3–1,0) **0,4;**
- гамма-випромінення земної кори (0,3–0,6) **0,5;**
- інгаляційне (переважно радон) (0,2–10,0) **1,2;**
- внутрішнє опромінення (переважно К-40) (0,2–0,8) **0,3;**
- **разом** (1,0–10,0) **2,4.**

## 7. Штучні джерела ІВ. Фактори, методи і засоби радіологічного захисту

Іонізаційні випромінення відіграють неоцінну роль майже у всіх сферах людської діяльності: науці, біології, ветеринарії, медицині, сільському господарстві, промисловості, енергетиці. Різноманітні й численні хімічні реакції відбуваються за дії ІВ при значно нижчих температурах і тискові. Дією ІВ отримують мутації рослин для створення їх нових сортів і нових штамів мікроорганізмів. Застосовують ІВ також для стерилізації медичних виробів і матеріалів. Джерела ІВ широко використовують для діагностики і лікування захворювань.

Для забезпечення всіх названих потреб створено велике розмаїття штучних джерел ІВ, в яких генеруються випромінення різного типу, різних енергій і різних потужностей дози. Джерелами ІВ можуть бути апарати і пристрої енергетичного, промислового, наукового і медичного призначення (наприклад, установки для рентгеноструктурного аналізу, електронні мікроскопи, ікс-терапевтичні і рентгенодіагностичні апарати, лінійні і циклічні прискорювачі електронів, циклічні прискорювачі протонів тощо), в яких ІВ виникають за рахунок перетворення електричної енергії в кінетичну заряджених частинок або ікс-проміння. Такі пристрої генерують ІВ тільки при вмиканні в мережу електричного струму. Інші джерела ІВ вміщують різного типу і різної кількості радіоактивні нукліди, як наприклад, гамма-дефектоскопи, гамма-терапевтичні апарати, радіоізотопні джерела електроживлення (зокрема для космічних апаратів) і безліч інших, у вигляді герметичних

капсул для найрізноманітніших потреб. Такі джерела вимагають особливої неперервної уваги з погляду радіаційної безпеки.

Особливими джерелами можливого масштабованого радіоактивного опромінення є ядерні енергетичні установки — ядерні реактори атомних електростанцій, підводних човнів і кораблів.

Усі фактори захисту можна узагальнити в три категорії:

- захист часом,
- захист відстанню і
- захист екрануванням.

Захист часовим фактором реалізується в різних варіантах регламентування часу перебування персоналу у сфері дії радіації в межах, що виключають можливість перевищити допустимі рівні опромінення.

Захист відстанню забезпечується оптимальним розташуванням робочих місць персоналу і шляхів його переміщення на можливо максимальній відстані від джерела випромінювання.

Захист часом і відстанню буває найбільш економічно прийнятним. Проте, цілком зрозуміло, що цих факторів може бути недостатньо, щоб забезпечити повною мірою персонал від опромінення на рівнях, що не перевищують допустимих. Крім того, часовий фактор, якщо відсутні додаткові механізми контролю його застосування, може легко порушуватися. Тому, як правило, захист екрануванням розглядається майже як головний фактор захисту. *Захисне протирадіаційне екранування* — це конструювання різноманітних стаціонарних і пересувних перепон із матеріалів, здатних ефективно поглинати іонізуюче випромінювання. Захист може бути створений навколо джерела, обладнання і/чи приміщення. В першому випадку захисний кожух оточує джерело, як наприклад, ікс-променеву трубку, в другому — всю апаратуру, як у випадку промислових дефектоскопічних установок. Захист робочих приміщень закладається в будівельні конструкції: стіни, стелю чи підлогу, вхідні двері, міжкімнатні вікна.

*Медичні рентгенівські апарати.* Використовують для проведення флюороскопії, рентгенографії і променевого лікування (ікс-терапії). Захист у медичних рентгенологічних кабінетах передбачається як для персоналу, так і пацієнтів. Допустима доза для персоналу регламентується. Сучасна

рентгенологічна апаратура конструктивно забезпечує низькі рівні опромінення персоналу, тому допустима доза ніколи не перевищується, хіба що у випадках бруталного порушення правил радіологічного захисту в окремих, надто рідких, випадках. Крім конструктивних рішень щодо апаратури, для захисту персоналу використовують різноманітні додаткові захисні пристрої і речі, як то малі і великі ширми із захисних матеріалів, персональні фартухи, рукавички з просвинцьованої гуми тощо.

Для хворих діагностична доза не регламентується, встановлюються лише *рекомендовані діагностичні рівні* для кожного окремого дослідження, які слугують для оптимізації опромінення хворих і водночас контролю якості проведення рентгенологічних досліджень у даному рентгенівському кабінеті. Дозу опромінення хворих при променевої терапії приписує лікар залежно від виду захворювання в межах, що забезпечують оптимальний лікувальний ефект. Безумовно, що існують правила зниження «неробочого» опромінення хворих, головне з яких полягає в тому, що має опромінюватися лише ділянка тіла, що діагностується чи лікується. Інші частини тіла, надто гонади, необхідно екранувати спеціальними засобами захисту (свинцева гума, тубуси).

*Немедичні ікс- і гамма-апарати.* Ікс- і гамма-дефектоскопія стали загальноприйнятими методами випробовування без руйнації виробів, вузлів і деталей, призначених працювати в жорстких фізичних умовах, при тому забезпечуючи високу надійність. Промислове використання апаратів для радіаційної дефектоскопії вимагає більшої уваги до радіологічного захисту ніж медична рентгенодіагностика, бо працівники промисловості мало знайомі з особливостями біологічної дії радіації і тому схильні або недооцінювати радіаційну небезпеку, або перебільшувати можливі ризики. Крім того, розглядувані радіаційні установки в промислових умовах експлуатуються зі значно більшим навантаженням, що збільшує ризик виходу їх з-під контролю чи з ладу. І нарешті, контрольовані виробни на таких установках характеризуються надто широким варіюванням за розмірами, конструкцією, матеріалами і рівнем забезпечуваної надійності, що створює значний рівень фізичного і психологічного навантаження на операторів таких установок. Узагальнено і коротко

можна твердити, що найкращий варіант гарантування безпеки експлуатації установок радіаційної дефектоскопії із запобіганням радіаційним інцидентам чи аваріям — це монтування їх у спеціальних процедурних, захищених радіаційними перепонами, і максимальна автоматизація технологічного процесу.

*Мегавольтні установки різного призначення і конструктивних особливостей.* Особливості радіаційного захисту персоналу на установках такого типу пов'язані з двома важливими обставинами: по-перше, при енергіях випромінювання понад 10 МеВ, які викликають фотодезінтеграцію ядер, виникає не проста проблема захисту від нейтронів, і, по-друге, висока вартість захисних конструкцій проти випромінювання таких енергій. Для зменшення напруженості цих проблем максимально використовують як ефективний за таких умов фактор радіологічного захисту — відстань.

*Відкриті радіоактивні джерела.* Такі джерела, зазвичай у формі розчинів хімічних сполук широкого спектра радіонуклідів, використовують у ядерній медицині для діагностичних і лікувальних цілей, наукових досліджень і в промисловості — для контролю деяких процесів. Застосування радіоактивних матеріалів пов'язане з ризиками не тільки зовнішнього опромінення людей, але і можливістю потрапляння в організм людини через шкіру, травний тракт і дихальні шляхи з наступним внутрішнім опроміненням. Цілком зрозуміло, що за таких умов виникає необхідність у специфічних заходах радіологічного захисту, спрямованих не тільки на зменшення ймовірності зовнішнього опромінювання, але й максимального унеможливлення прямого контакту персоналу з радіоактивними рідинами. Для цього використовують спеціальні герметичні шафи для роботи з такими джерелами і, по можливості, автоматизацію робіт.

*Закриті радіоактивні джерела.* Такі джерела іонізуючих випромінювань різних типів за використанням радіонуклідів, призначенням, інтенсивністю випромінювання, розмірами і конструкцією і, нарешті, фізико-хімічним станом загерметизованого в оболонку радіонукліда, є чи не найбільш розповсюдженими. Може здатися парадоксальним, але ці джерела найчастіше стають чинниками радіаційних інцидентів на промисло-

вих підприємствах, в медицині і побуті. Нерідко трапляються втрати подібних джерел через недбальство чи невдалу конструкцію пристрою, у який вмонтована радіонуклідна капсула. Подальша доля герметичних джерел буває цілком непередбачуваною. Кожний такий випадок — це детективна історія і, як правило, з трагічним кінцем. Оскільки людина не має рецепторів для відчуття іонізуючої радіації, суб'єкт, а це може бути і група підлітків, і зловмисник, і особи із силових структур, і працівники підприємства і будь-хто ще, до рук якого (яких) потрапляє тепла на дотик і блискуча капсула чи циліндр, не має можливості відчутти загрозу, яка виходить з цієї фатальної знахідки. Ще одна наразі актуальна проблема, пов'язана із закритими радіоактивними джерелами, це проблема можливого радіаційного тероризму. Саме з усіх викладених причин і обставин закриті джерела вимагають не тільки радіологічного, але й фізичного захисту.

Джерела часто «губляться» під час війн і переворотів, наприклад, після розпаду СРСР і Югославії, громадянських війн в Африці, війн у Кореї, В'єтнамі, Іраку. Їх виявляють на прикордонних контрольно-пропускних пунктах або у великих плавильних печах, на яких встановлені радіаційні монітори.

Наразі в усіх державах світу діють вимоги ліцензування кожного джерела, встановлені міжнародними організаціями з радіаційної безпеки НКДАР, МАГАТЕ, МКРЗ, що забезпечує можливість простежити його повний цикл від введення в дію до кінцевого захоронення. На жаль, таким шляхом можна відстежувати долю тільки тих джерел, які призначені для відкритої практики.

Надходження до редакції 23.11.2011.

Прийнято 23.11.2011.

Адреса для листування:

Пилипенко Микола Іванович,  
ДУ Інститут медичної радіології ім. С.П. Григор'єва  
НАМН України,  
вул. Пушкінська, 82, Харків, 61024, Україна