

ВСТУП

Радіаційна медицина, її місце серед медичних дисциплін

Існує непевність у використанні терміна *радіаційна медицина*. У світовій англomовній літературі і медичній практиці цей термін вживається рідко і як синонім променевої терапії в усіх її різновидах (зокрема, радіотерапії відкритими радіонуклідами), а в найголовніших англomовних термінологічних словниках відсутній. У Німеччині кілька відомих спеціалізованих радіологічних клінік (у містах Аахен, Менхенгладбах, Мюнхен), в яких проводять лікування радіонуклідами, називаються *клініками радіаційної медицини*.

Уперше цей термін для позначення наукових і практичних проблем патогенезу, діагностики, лікування і профілактики радіаційних уражень (зокрема променевої хвороби) був використаний 1955 р. у СРСР: того року було видано керівництво для лікарів і студентів колективу авторів під загальною редакцією відомого радіобіолога акад. А. Лебединського з назвою «Радиационная медицина» (М., «Медгиз», 1955). У книзі розкривалися питання патофізіології, клініки і терапії променевої хвороби. Після радіаційних аварій — уральської (на атомному виробництві «Маяк», 1949) і, особливо, чорнобильської (на IV блоці Чорнобильської АЕС, 1986), що мали наслідки для сотень тисяч людей і до вивчення і ліквідації яких були залучені великі контингенти лікарів і науковців, термін *радіаційна медицина* в державах СНД зажив статусу загальнозживаного поняття, до якого почали включати всі проблеми, стосовні профілактики, патогенезу (клінічної радіобіології), клініки і лікування усіх видів радіаційних уражень людини. Інколи як синонім вживається термін *атомна медицина*.

У Росії, Білорусії, Україні та інших державах СНД засновано наукові інститути і центри радіаційної медицини (наприклад, «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А. М. Никифорова» Міністерства Російської Федерації зі справ цивільної оборони, Федеральна державна наукова установа «Уральский научно-практический центр радиационной медицины», Науковий Центр «Медицинская радиология и радиационная медицина» РАМН (м. Обнінськ), Науково-дослідний клінічний інститут радіаційної медицини і ендокринології Міністерства охорони здоров'я Республіки Білорусії, Державна установа «Науковий Центр радіаційної медицини» НАМН України та інші). Але практичний фах (спеціальність) з такою назвою в офіційному реєстрі медичних спеціальностей в Україні відсутній.

Позаяк хронічного опромінювання низького рівня у процесі роботи з радіаційними джерелами зазнають працівники (персонал) різних категорій, питання впливу допустимого рівня опромінення належать до проблем більш загальної дисципліни — *медицини праці*. Персонал, професійно пов'язаний з роботою у сфері дії радіації, може також зазнавати опромінення більш

значного рівня в разі виникнення технологічних радіаційних інцидентів, медичні наслідки яких у вигляді радіаційних уражень різного ступеня тяжкості і поширеності також логічно відносять до компетенції медицини праці. Таким чином, радіаційна медицина може розглядатися як розділ медицини праці за аналогією до загальноновизнаних, наприклад, авіаційної медицини, медицини морського транспорту, космічної медицини тощо. Загальнобіологічні основи патогенезу радіаційних уражень розглядаються в *радіобіології*, а патогенез таких уражень людини — *клінічній радіобіології*, до компетенції якої належать також і питання теоретичних основ променевого лікування онкологічних і неонкологічних захворювань людини. Крім того, оскільки іонізуючим випромінюванням властива здатність спричиняти порушення хромосом клітинних ядер з різноманітними генетичними наслідками (тератогенез, уроджені захворювання, канцерогенез), радіаційна медицина розглядає також відповідні питання *клінічної генетики*. Тією чи іншою мірою радіаційна медицина має торкатися також проблем профілактики радіаційної патології, які розглядаються в *радіаційній гігієні*.

Хоч етіологічний фактор променевої патології — іонізуюче випромінювання — має за механізмами дії, вочевидь, свої яскраво виражені специфічні особливості і, як наслідок, свої специфічні патогенетичні риси, лікування її цілком можливе засобами, що використовуються в різних розділах внутрішньої медицини, а саме гематології, ендокринології, кардіології, неврології тощо.

Таким чином, радіаційна медицина є *клінічною інтегративною дисципліною*, в якій розглядаються питання, спільні з клінічною радіобіологією, клінічною генетикою, радіаційною гігієною і медициною праці, а надання медичної допомоги можливе в рамках традиційної внутрішньої медицини і, в певних випадках, — хірургії.

Трагічну історію знайомства людства з радіацією як патогенним фактором можна поділити на два періоди: перший із 1896 р. по 40-і роки ХХ сторіччя — період людських особистих драм і трагедій серед піонерів радіології, другий — наступні 50 років — період популяційних драм і трагедій як результат радіаційних аварій, катастроф і воєнного застосування ядерної зброї.

4 квітня 1936 р. на території шпиталю Св. Георга (м. Гамбург-Еппендорф, Німеччина), в якому працював один із видатних піонерів світової рентгенології Albers-Schönberg, що загинув від променевого раку, відбулось відкриття меморіалу пам'яті загиблим на той час у всіх країнах світу від дії радіації у зв'язку з їх професійною діяльністю (рис. 1). Меморіал має вигляд вапнякової стели, увінчаної кам'яним лавровим вінком. На передній поверхні стели напис: «Рентгенологам і радіологам усіх націй, лікарям, фізикам, хімікам, технікам, лаборантам і сестрам, які пожертвували своїм життям у боротьбі проти хвороб їх близьких. Вони героїчно прокладали шлях до ефективного й безпечного застосування рентгенівських променів і радію в медицині. Слава їх безсмертна». «Від Німецького Рентгенівського товариства». На інших поверхнях викарбовано імена 169 осіб, померлих у

страждань від радіаційних уражень, отриманих ними при роботі з ікс-променями і радієм. Наступного, 1937 року Н. Меуер видав «Книгу пошани» зі стислими біографіями тих, чий імена викарбовано на стелі. Але це був далеко не повний мартиролог піонерів радіології. Згодом позаду і збоку стели були встановлені додаткові камені з новими відкритими іменами загиблих першопроходців-радіологів, а 1959 року — опубліковано нове видання «Книги пошани» із 360 іменами.



Рисунок 1. Меморіал на честь трагічно загиблих від радіаційних уражень піонерів радіології, відкритий 4 квітня 1936 р. на території шпиталю Св. Георга (Гамбург-Еппендорф, Німеччина) від Німецького рентгенівського товариства

З тих, хто був серед перших, майже ніхто не зміг уникнути власного гіркого знайомства із загрозою для здоров'я і життя від невидимої і невідчутної, але такої багатонадійної і тим знаджуючої енергії, нареченої радіацією. Анрі Беккерель, лауреат Нобелівської премії як автор відкриття випромінювання солями урану невидимих променів, подібних до ікс-променів, тільки-но описаних В. Рентгеном, отримав радіаційний опік шкіри з виразкою від ампули з радієм, яку деякий час носив у кишені жилета. Марія Склодовська-Кюрі, двічі лауреат Нобелівської премії, померла від лейкемії в невеликій лікарні містечка Санселлемоз у французьких Альпах. Доктор Тобе про це зробив офіційний запис: «Мадам Кюрі померла в Санселлемозі 4 липня 1934 року. Хвороба — гостра злякисна анемія. Кістковий мозок не дав реакції, можливо, внаслідок переродження від довгого накопичення радіоактивних випромінень». Ірен Жоліо-Кюрі, донька Марії Кюрі і теж лауреат Нобелівської премії за відкриття штучної радіоактивності, померла в Парижі 17 березня 1956 року від гострої лейкемії. Лікар-рентгенолог С. П. Григор'єв, засновник Рентгенівської академії у Харкові (нині — Інститут

медичної радіології НАМН України ім. С.П. Григор'єва), хворів на радіаційний рак шкіри руки і хронічну променевою хворобу. Рання смерть від інфекційної хвороби спричинилася через ураження імунітету.

Тільки Вільгельм К. Рентген, що започаткував історію радіології, провівши 7 тижнів затвірництва у своїй фізичній лабораторії сам на сам з трубкою Крукса, яка випромінювала таємниче проміння (ікс-проміння), і виконуючи експеримент за експериментом з цим промінням, не мав жодних ознак погіршення здоров'я, і навіть його розкішні борода і шевелюра залишилися незміненими. Можливо, що він завбачав шкоду живим тканинам від тих таємничих променів, і уникав опромінювання ними, закриваючись перед вмиканням трубки в свинцевій шафі, в якій тримав запас фотопластин, необхідних для дослідження ікс-променів.

За американськими даними, тривалість життя рентгенологів у період 1938—1942 рр. була в середньому на 5,2 року менше, ніж лікарів інших спеціальностей, становлячи 60,5 і 65,7 років, відповідно. Рентгенологи накопичували за 30–35 років практичної діяльності дози до 10 Гр. Середня коротша тривалість їхнього життя була зумовлена вищою частотою виникнення новоутворів, зокрема гемобластозів, частішим раннім розвитком дегенеративних змін і інфекційних ускладнень. У радіологів США в період між 1929 і 1957 рр. лейкемії були зареєстровані в 4%, тобто в 10 разів частіше, ніж серед не радіологів (0,4%).

Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ), створена 1928 р., 1934 р. запропонувала перший ліміт професійного опромінення («толерантну дозу») у 200 мР/доб. В подальшому допустима доза професійного опромінення переглядалась неодноразово, і після істотного перегляду цих допустимих рівнів 1957 р. в наступні роки захворюваність радіологів на лейкози не відрізнялась від захворюваності серед інших верств населення.

ФІЗИКА ІОНІЗИВНИХ ВИПРОМІНЕНЬ.

РАДІАЦІЙНІ ВИМІРЮВАННЯ. ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЕНЬ

1.1. Види і властивості іонізуючих випромінень (ІВ)

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

Енергія ІВ вимірюється в *електрон-вольтах* (eВ, 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 (2×10^3 eВ) є фотонами оптичного діапазону електромагнітного випромінення (світлом), а при більшій енергії вони здатні іонізувати атоми середовища, отже належать

до іонізувальних. Якщо енергія фотонів становить щонайменше 10 MeV (10×10^6 eV), їх взаємодія з ядром атома призводить до руйнації останнього з викидом з нього нейтрона, протона чи альфа-частинки. Цей процес носить назву *фотодезінтеграція* (рис. 1.1).

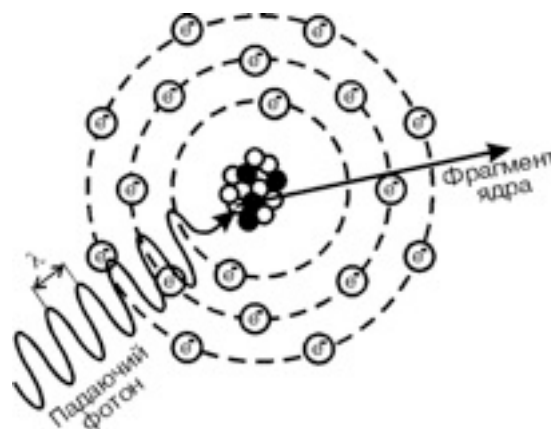


Рисунок 1.1. Схема процесу взаємодії фотонів надвисокої енергії з ядром атома з фотодезінтеграцією останнього

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

Ікс-промені виникають при взаємодії струменя електронів з атомами будь-якої речовини. У полі атомів електрони гальмуються, і 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 (γ) — 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 (β^-). 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, що народжується в парі з електроном при гальмуванні фотона з енергією не менше $1,022$ МеВ, позаяк маса кожної з цих частинок дорівнює 511 кеВ. Крім того, існують позитрони ядерного походження. Ядра деяких нестабільних нуклідів розпадаються з випроміненням позитрона (так званий *позитронний бета-розпад*), який виникають в ядрі в результаті розпаду протона на нейтрон і позитрон. В такому випадку нейтрон залишається в ядрі, а позитрон випромінюється за його межі.

Позитрони, будучи частинками антиматерії, в оточені матерії 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 кеВ кожний. Цей процес носить назву *анігіляція*. Анігіляційні фотони розлітаються в протилежні боки під кутом 180° (рис. 1.2). На основі явища анігіляції розроблено ядерномедичний діагностичний метод під назвою *позитронна емісійна томографія* (ПЕТ), за допомогою якого отримують медичні молекулярні зображення.

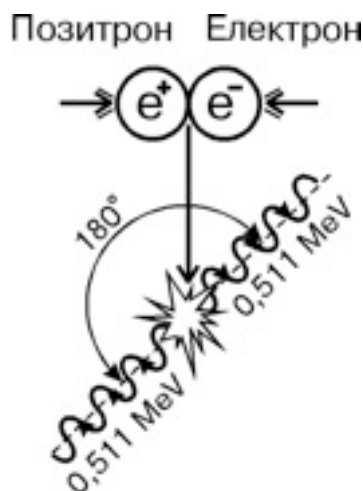


Рисунок 1.2. Схема процесу анігіляції пари електрон–позитрон

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

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

Альфа-частинка (α) — композитна частинка, що складається з 2 нейтронів і 2 протонів, тобто еквівалентна ядру гелію, має заряд $+2$ і масу $3,8$ ГеВ ($3,8 \times 10^{12}$ еВ, 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.

1.2. 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 (рис. 1.3).

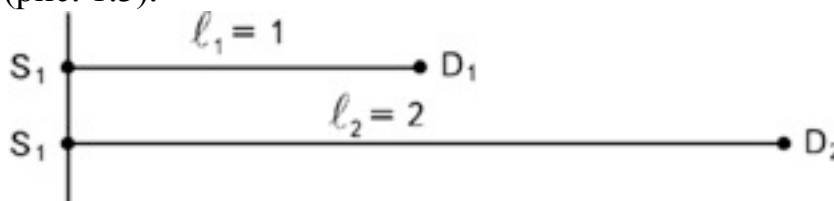


Рисунок 1.3. Зміна інтенсивності струменя випромінення обернено пропорційна квадрату відстані від його джерела. D_1 і D_2 — інтенсивності струменя на відстані l_1 і l_2 від джерела, відповідно. $l_2 = 2l_1$, $D_2 = \frac{1}{4} D_1$

Математично цю закономірність виражає рівняння:

$$D_2 = D_1 \times l_1^2 / l_2^2 \quad (2.1)$$

де D_1 — інтенсивність струменя випромінення на відстані від джерела l_1 ,
 D_2 — інтенсивність струменя випромінення 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 випромінення з атомами носить імовірностний (статистичний) характер, тому інтенсивність струменя в речовині згасає за *експоненціальним законом*: на кожній одиниці товщини однорідної речовини (поглинача) поглинається одна і та ж частка випромінення. Якщо в першій одиниці товщини шару речовини поглинеться 1% із 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 (рис. 1.4).

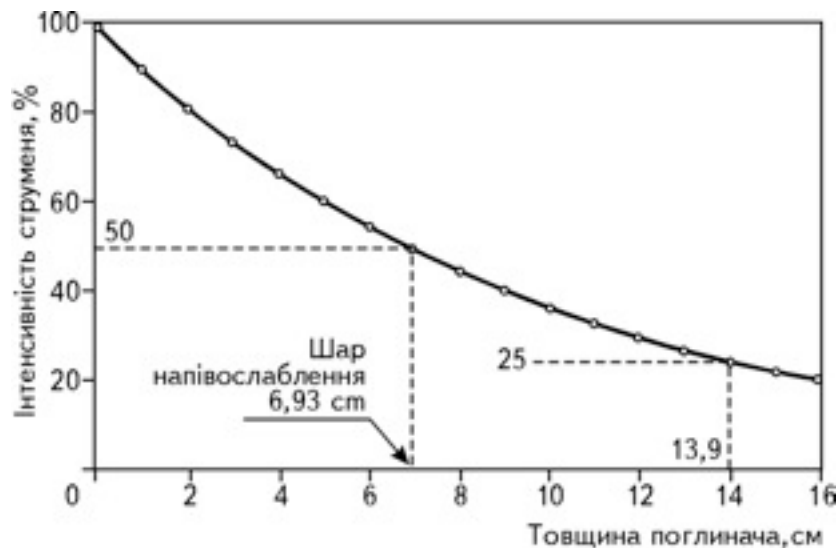


Рисунок 1.4. Закономірність падіння інтенсивності струменя випромінювання в речовині

Цілком зрозуміло, що зі збільшенням питомої густини речовини імовірність зіткнень випромінювання з атомами зростає, тобто здатність речовини ослаблювати струмінь випромінювання залежить від її питомої густини. Інакше кажучи, речовина з високою питомою вагою буде ослаблювати струмінь випромінювання інтенсивніше, ніж із низькою. Саме тому для захисту від радіації використовують такі матеріали як бетон, зокрема баритобетон (бетон з вмістом нерозчинної сполуки барію — сірчаноокислого барію), свинець, збагачений 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 випромінювання 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 випромінювання.

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 випромінювання в таку самою мірою, 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:

1. когерентне (томпсонівське, класичне) розсіювання,
2. комптонівське розсіювання (комптон-ефект),
3. фотоелектричний ефект,
4. утворення пари (або триплету) і
5. фотодезінтеграція.

Когерентне розсіювання полягає в тому, що падаючий фотон у полі атома змінює напрямок руху (розсіюється), не втрачаючи кінетичної енергії (рис. 1.5).

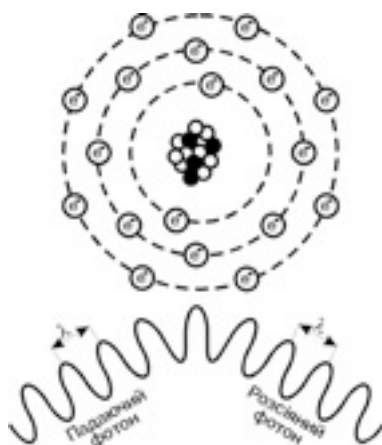


Рисунок 1.5. Схема когерентного (класичного) розсіювання фотонів ікс-променів на атомі речовини

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.

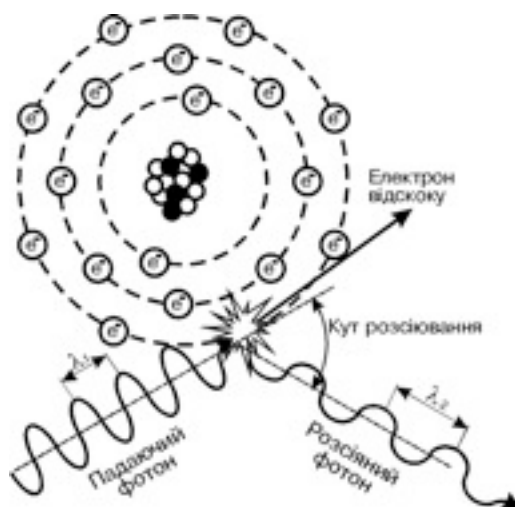


Рисунок 1.6. Схема комптонівського розсіювання фотонів в речовині

Комптонівське розсіювання — зміна напрямку руху фотона з одночасною втратою частини його енергії в результаті прямого стикання з електроном атома (рис. 1.6). Унаслідок 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. У результаті поглинута енергія в поверхневих шарах речовини може бути меншою, ніж на деякій, залежно від початкової 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 — процес, за якого фотон при стиканні з електроном атома передає йому всю свою енергію (поглинається електроном), і останній отримує достатню енергію, щоб покинути атом. Такий електрон носить назву *фотоелектрон* (рис. 1.7). Його вакантне місце займає інший електрон з більш віддаленої електронної оболонки, випромінюючи при цьому квант характеристичного ікс-випромінювання.

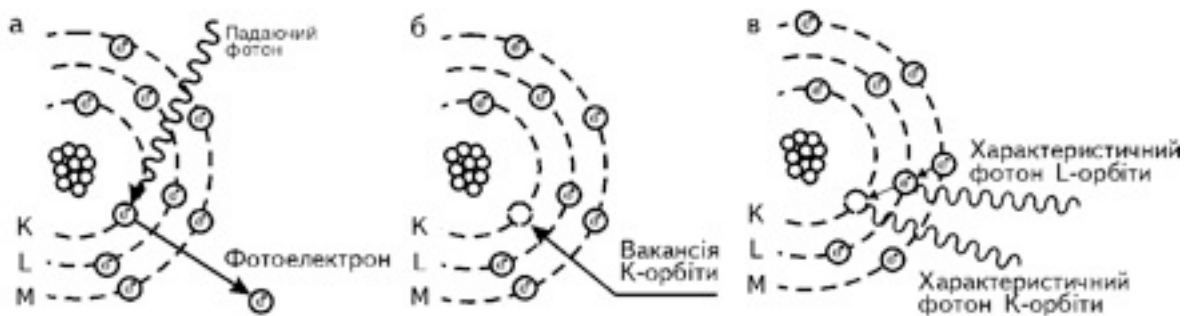


Рисунок 1.7. Схема послідовних етапів фотоелектричного ефекту. **а** — зіткнення падаючого фотона з електроном К-оболонки і викид останнього за межі атома; **б** — вакансія на К-оболонці; **в** — заповнення вакансії К-оболонки електроном з L-оболонки і випромінювання останнім фотона характеристичного ікс-випромінювання К-оболонки, і далі заповнення утвореної вакансії L-оболонки електроном з М-оболонки з випромінюванням фотона характеристичного ікс-випромінювання L-оболонки

Утворення пари — процес, за якого високоенергетичний фотон ($E \geq 1,022$ МеВ) трансформується в пару частинок — електрон і позитрон, тобто відбувається перетворення енергії в матерію (рис. 1.8).

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

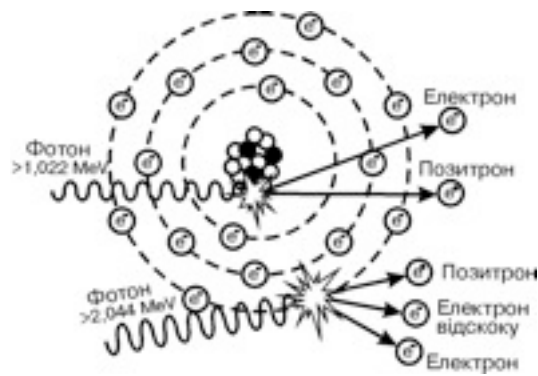


Рисунок 1.8. Утворення в полі атома із високоенергетичного фотона пари частинок — електрона і позитрона. Якщо така подія відбувається на орбітальному електроні, утворюється триплет, позаяк до народженої пари частинок приєднується вибитий з орбіти електрон відскоку

Про *фотодезінтеграцію* надвисокоенергетичним фотоном ядра атома уже згадано вище. До того треба додати, що внаслідок фотодезінтеграції виникає нестабільний (зазвичай, коротковічний) атом. При лікуванні онкологічних хворих мегавольтним випроміненням 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.

Частість зіткнень струменя фотонів чи частинок з атомами середовища залежить від їхніх маси, заряду та енергії. Вочевидь, частинки з більшою масою та електричним зарядом мають шанси частіше взаємодіяти з атомами, і тому на їхній траєкторії залишиться багато іонізованих атомів на *одиницю довжини пробігу* в середовищі (рис. 1.9).

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

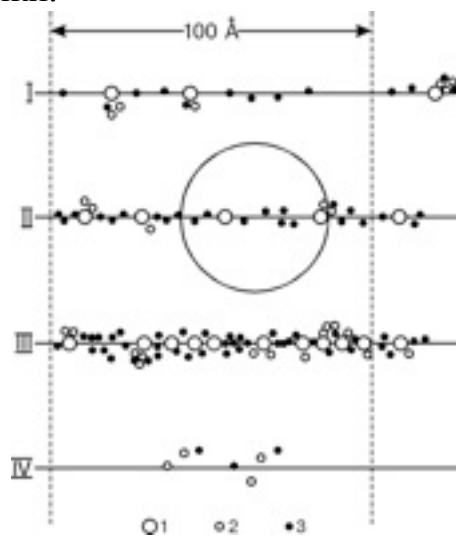


Рисунок 1.9. Схема відтинків траєкторії різних типів ІВ з розподілом на них актів взаємодії із атомами середовища. 1 — первинна іонізація; 2 — вторинна іонізація; 3 —

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

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 — із зростанням 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*.

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 відповідатиме коротка довжина їх пробігу. Також зрозуміло, що в середовищах високої питомої густини довжина пробігу ІВ також скорочується в міру швидкого поглинання їх енергії.

1.3. 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 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 випромінення (для цього вживають інші міри, наприклад, *щільність струменя випромінення*). 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 випромінення.

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 враховувати загальну кількість енергії, поглинуту живою речовиною, тому що рівень біологічних ефектів стосовно цілісного організму вочевидь залежить саме від цієї

величини. Адже зрозуміло а priori, що *локальне опромінення* тварини чи людини матиме менш фатальні наслідки, ніж опромінення *тотальне* за умови, що в обох випадках на кожну 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 опромінення.

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 опромінення 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, тому що 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 опроміненні. 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 називають *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 рис. 1.10 наведено принципову схему будови радіаційного дозиметра.



Рисунок 1.10. Принципова схема будови радіаційного дозиметра

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 рівня певних ефектів, які відбуваються в модельному середовищі при взаємодії ІВ з його атомами. За типом цих

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* (рис. 1.11), заповнена повітрям. Розміри камери, тобто об'єм повітря в ній, варіюють від долей 1 см^3 до 1000 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, у результаті чого останні іонізуються. 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*.

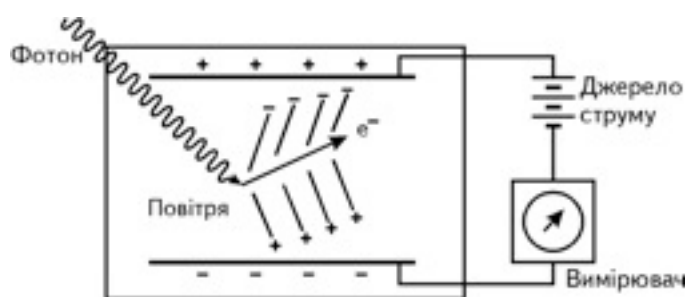


Рисунок 1.11. Принципова схема будови і дії іонізаційного дозиметра

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 фотоелектронний помножувач (ФЕП). Енергія випромінення в 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 додатком *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 будь-чого матеріального, а «опромінення» — це дія. Проте коректним, а тому рекомендованим для загального вжитку, є термін *доза опромінення*, зважаючи на те, що доза опромінення має сприйматись як *кількісна міра рівня діїрадіації*. 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 (SI).

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 *поглинута доза*.

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

$$D = E/M \quad (2.2)$$

де D — поглинута доза; E — поглинута сумарна кількість енергії; M — маса опроміненої речовини.

Поглинуту дозу даній речовини розраховують за формулою:

$$D = f \times X \quad (2.3)$$

де f — Φ -фактор; X — експозиційна доза.

Φ -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 дозу більшу, ніж м'язи, а останні — ніж жирова тканина (Φ -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 випромінь,

як уже зазначалося, мають неоднаковий характер розподілу актів 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 уражаючої 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):

$$H = D \times Q_F \quad (2.4)$$

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 не є 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 вирішило 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 *ефективна доза*.

Ефективна доза — це сума добутоків еквівалентних доз (H_T) в окремих органах і тканинах на *тканинні зважувальні фактори* (W_T).

$$E = \sum (H_T \times W_T) \quad (2.5)$$

Органний чи тканинний зважувальний фактор (W_T) встановлює внесок 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 підсумовуються для однієї людини протягом всього життя і ця сумарна величина приймається за показник *накопиченого ризику* опромінення.

Для оцінки негативної значущості дозового навантаження на всю популяцію людей введено поняття *колективна ефективна доза* (E_p), яку визначають як суму всіх ефективних доз, одержаних опроміненими особами в популяції:

$$E_p = \sum E \quad (2.6)$$

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

- експозиційна доза (exposure),
- поглинута (абсорбована) доза (absorbeddose),
- еквівалентна доза (doseequivalent),
- ефективна доза (effectivedose),
- колективна ефективна доза (collectiveeffectivedose).

Для визначення величини цих доз вживають одиниці:

- для експозиційної дози — **кулон на кілограм** (К/кг) (coulombperkiligram (C/kg)) і **рентген** (Р) (roentgen (R)),
- для поглинутої дози — **рад** (rad) і **грей** (Гр) (gray (Gy)),
- для еквівалентної дози — **бер** (rem) 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:

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

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

1.4. Радіоактивність

1896 р. А. Беккерель встановив явище випромінювання ураном випромінювання, подібного до ікс-променів, відкритих рік до того Вільгельмом К. Рентгеном. За пропозиції М. Складовської-Кюрі, яка разом з А. Беккерелем досліджувала це явище, йому дали назву **радіоактивність**. Згодом були відкриті й інші природні **радіоактивні** хімічні елементи, а 1934 р. донька М. Складовської-Кюрі Ірен Жоліо-Кюрі разом з чоловіком Фредеріком Жоліо-Кюрі встановили можливість отримувати радіоактивні елементи штучно — явище, назване **штучна радіоактивність**.

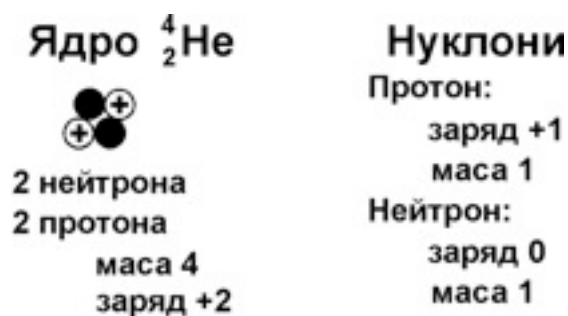


Рисунок 1.12. Фізичні характеристики нуклонів — протонів і нейтронів.

Як відомо, ядро атома складається з елементарних частинок із загальною назвою **нуклони** (рис. 1.12). 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 належності даному елементу. Такі варіанти ядра атома хімічного елемента з різною кількістю нейтронів отримали назву його *ізотопів*, оскільки є одним і тим самим елементом і тому розташовані в періодичній таблиці хімічних елементів в одній позиції. Окремий ізотоп елемента називається *нуклід*, але ці два терміни зазвичай вживають і як синоніми.

Таблиця 1.1

Ізотопи водню

Символ	Протони Z	Нейтрони N	Атомне число A	Ім'я
${}^1\text{H}$	1	0	1	Protium
${}^2\text{H}$	1	1	2	Deuterium
${}^3\text{H}$	1	2	3	Tritium

Як приклад у таблиці 1.1 наведено ізотопи водню (H) з масами ядра в 1, 2 і 3 одиниці. Перший ізотоп має назву *протій* (protium — *простий* (лат.)). Це найпоширеніший у природі (й усьому Всесвіті) ізотоп водню, ядро якого складається лише з 1 протона (нейтрони відсутні), тому його маса становить 1 і заряд +1. Другий ізотоп — *дейтерій* (deuterium — *другий*) з атомною масою 2. У цього ізотопу 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 протію. Останній — третій ізотоп (tritium— *третій*) має атомну масу 3 (в ядрі — 1 протон і 2 нейтрона). 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.

На відміну від водню, більшість елементів мають лише один природний ізотоп, як наприклад, фосфор(${}^{31}\text{P}$). Усі його інші ізотопи (рис. 1.13), зокрема з масою ядра 30 (${}^{30}\text{P}$) і 32 (${}^{32}\text{P}$) — штучного походження.

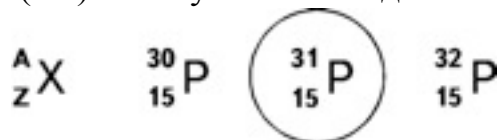


Рисунок 1.13. Ізотопи фосфору: ізотоп з атомною масою 31 (${}^{31}\text{P}$) — природний, два інших ${}^{30}\text{P}$ і ${}^{32}\text{P}$ — штучні. Форма запису ізотопів: X — символ елемента, A — атомна маса, Z — заряд ядра (номер елемента в періодичній таблиці елементів).

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

Найбільш поширеними природними радіонуклідами, внесок яких у не антропогенне опромінення людей, є вуглець-14, калій-40, радон-222, радій-226, уран-235, уран-238 і торій-232 (рис.1.14).

Природні радіонукліди

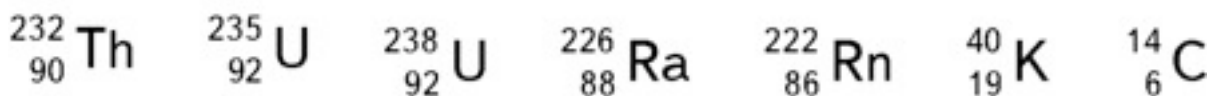


Рисунок 1.14. Найпоширеніші природні радіонукліди

Вуглець-14 постійно синтезується в атмосфері під дією космічних променів зі стабільного нукліда ${}^{16}\text{C}$ і поглинається із повітря рослинами, а далі з рослинною їжею — до організму людини. Цей нуклід вносить до 15% її природного внутрішнього опромінення. У біологічних об'єктах, допоки в них підтримується обмін речовин, ці два ізотопи вуглецю перебувають в 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 (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 радіоізотопу 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 (рис. 1.15 і 1.16).

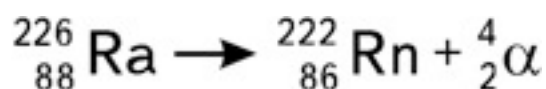


Рисунок 1.15. Принципова схема альфа-розпаду ^{226}Ra . Ядро цього радіонукліда при розпаді випромінює альфа-частинку (маса 4 і заряд +2), в результаті чого утворюється ядро нового елемента ^{222}Rn

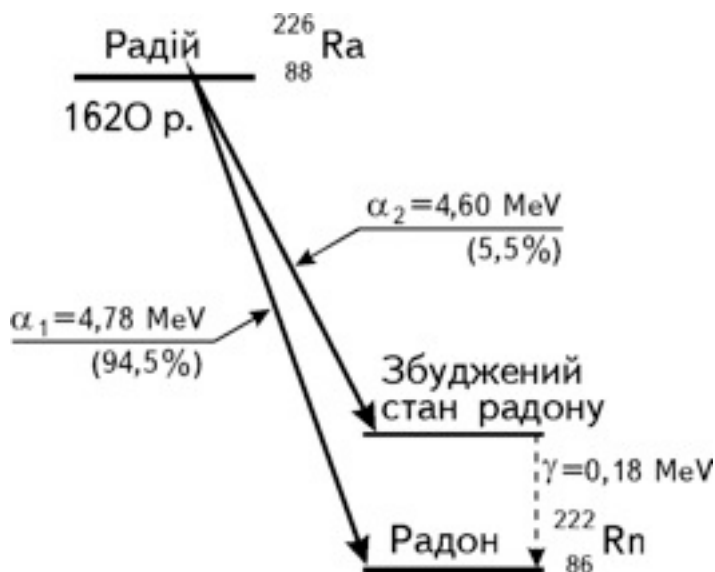


Рисунок 1.16. Схема фізичних процесів при розпаді ^{226}Ra : 94,5% ядер цього радіонукліда при розпаді випромінюють тільки альфа-частинку з енергією 4,78 MeV, інші 5,5% ядер — альфа-частинку з енергією 4,60 MeV і потім — гамма-квант з енергією 0,18 MeV

Бета-розпад. Є два варіанти бета розпаду — *електронний* і *позитронний*. У першому варіанті 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») (рис.1.17).

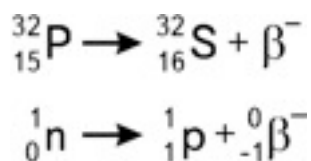


Рисунок 1.17. Принципова схема електронного бета-розпаду. Ядро радіонукліда фосфору-32 випромінює бета-частинку із зарядом -1 (електрон), який утворюється в результаті розпаду одного з нейтронів на дві заряджені частинки — протон, який залишається в ядрі, і випромінюваний електрон. Як результат, заряд ядра збільшується на одиницю, і фосфор перетворюється на сірку

На протилежність цьому, в іншому варіанті бета-розпаду — *позитронному* — 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 (рис.1.18).

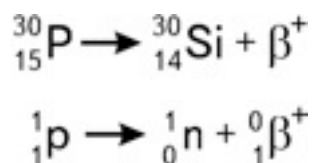


Рисунок 1.18. Принципова схема позитронного варіанту бета-розпаду. Ядро радіонукліда фосфору-30 випромінює бета-частинку із зарядом +1 (позитрон), який утворюється в результаті перетворення одного з протонів у дві частинки — нейтрон, який залишається в ядрі, і випромінюваний позитрон. Як результат, заряд ядра зменшується на одиницю, і фосфор перетворюється на кремній

У деяких випадках бета-розпаду після випромінення електрона чи позитрона ядро дочірнього радіонукліда залишається в енергетично збудженому — *метастабільному* — стані і лише через деякий час (інколи досить значний) переходить у стабільний, випромінивши надлишок енергії у вигляді гамма-кванта. Радіоізотопи, ядра яких після випромінення бета-частинки продовжують перебувати в збудженому стані, називають *метастабільними* (рис.1.19).

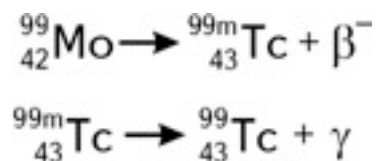


Рисунок 1.19. Принципова схема бета-розпаду з утворенням проміжного радіонукліда в метастабільному стані. Ядро радіонукліда молібдену-99 випромінює бета-частинку із зарядом -1 (електрон) з перетворенням на радіонуклід технецію-99m, ядро якого залишається значний час у збудженому (з надлишком енергії) 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 (${}^{99}\text{Tc}$).

На рис. 1.20 наведено схеми фізичних процесів у ядрах при різних типах бета-розпаду.

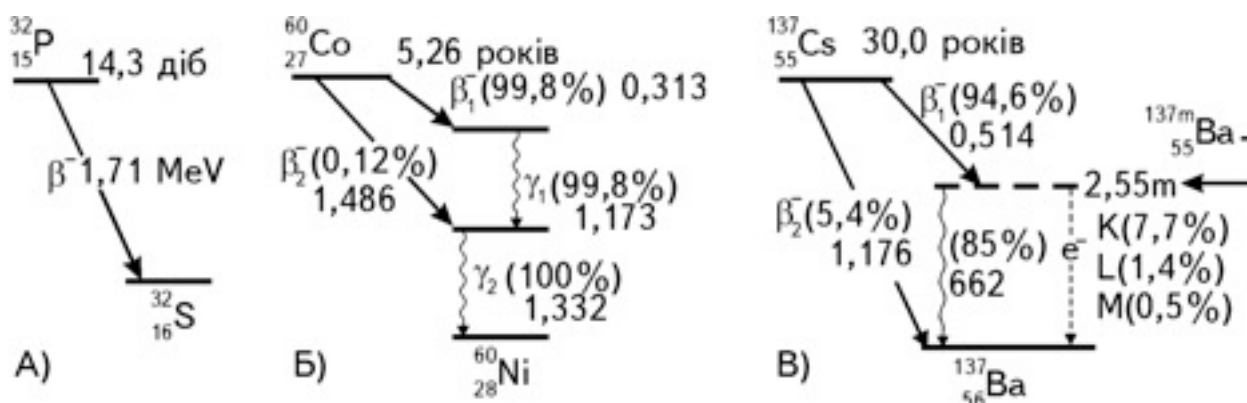


Рисунок 1.20. Схеми фізичних процесів при бета-розпаді: **А)** — ядро радіонукліда ^{32}P при розпаді випромінює тільки електрон з енергією 1,71 MeV, перетворюючись зразу на стабільний нуклід сірки; **Б)** — 0,12% ядер радіонукліда ^{60}Co при розпаді випромінюють електрон з енергією 1,47 MeV і гамма-квант з енергією 1,332 MeV, перетворюючись на стабільний нуклід нікелю. Інші 99,8% ядер випромінюють електрон з енергією лише 0,31 MeV і послідовно 2 гамма-кванта з енергією 1,17 MeV і 1,33 MeV; **В)** — 5,4% ядер радіонукліда ^{137}Cs випромінює електрон з енергією 1,18 MeV, перетворюючись зразу на стабільний нуклід барію. Інші 94,6% ядер випромінюють послідовно електрон з енергією 0,514 MeV і гамма-квант з енергією 0,662 MeV

К-захват. При цьому типі розпаду ядро набуває стабільності в результаті поглинання ним електрона з К-оболонки (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 зміщенням 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* (рис 1.21). Отже, радіонукліди такого типу розпаду випромінюють тільки фотонне випромінення (як і метастабільні), і тому становлять значний інтерес для використання в радіонуклідній діагностиці, тому що забезпечують пацієнтові дози опромінення низького рівня.

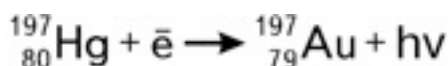


Рисунок 1.21. Схема радіоактивного розпаду ядра за типом К-захоплення. Ядро радіонукліда ртуті-197 захоплює електрон з К-орбіти (найближчої до ядра). Захоплений ядром електрон з'єднується з протоном, утворюючи нейтрон. Як результат, заряд ядра зменшується на одиницю, і ртуть перетворюється на золото

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

Акт розпаду ядра радіоізоотопу є ймовірнісним явищем, тому кількість радіоізоотопу 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, не зважаючи на зменшення кількості ядер з часом у результаті їх розпаду. (рис. 1.22). Ця закономірність носить назву *закон радіоактивного розпаду*.

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

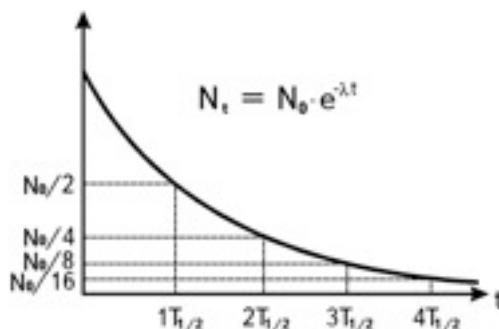


Рисунок 1.22. Закон радіоактивного розпаду. N_0 — початкова кількість радіонукліда, N_t — залишок радіонукліда через проміжок часу t ; $T_{1/2}$ — час напіврозпаду радіонукліда, e — основа натурального логарифма; λ — стала розпаду

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

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda, \quad \lambda = 0,693/T_{1/2} \quad (2.7)$$

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

$$\Theta = 1,44 \times T_{1/2}. \quad (2.8)$$

1.5. 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 радіоізоотопу від неперервного його розпаду, за *міру кількості радіонукліда* прийнято величину, яка називається *активність* (не плутати з «радіоактивність») і 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 *кюри*— 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:

$$\text{кБк} = 10^3 \text{Бк}; \text{МБк} = 10^6 \text{Бк}; \text{мКи} = 10^{-3} \text{Ки}; \text{мкКи} = 10^{-6} \text{Ки}.$$

Для вимірювання кількості радіонукліда застосовують прилади, які мають узагальнену назву —*радіометри* (рис. 1.23). 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 *лічильники випромінення*. На їх виході створюється електричний імпульс, або просто *імпульс* на ознаку попадання в нього фотона чи частинки. Найуживанішими лічильниками випромінень є *сцинтиляційні*.

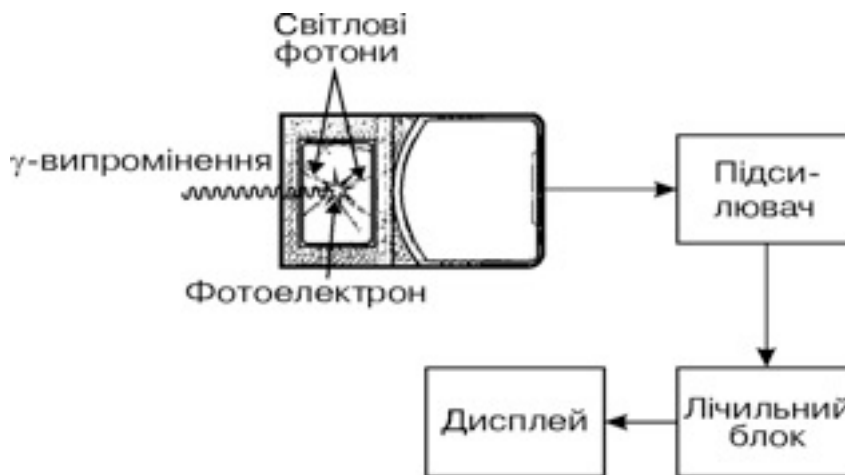


Рисунок 1.23. Принципова схема сцинтиляційного радіометра

Зрозуміло, що лічильник реєструє лише частину випромінень, що 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.

1.6. Природний радіаційний фон

Протягом усієї своєї історії становлення та існування все живе на Землі зазнає неперервного опромінювання від природних джерел ІВ — космічних променів, випромінення 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 міжзіркового 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 вище (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.

Випромінення 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 джерела 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 кварцитового 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 щибенях — 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 просотуватися 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 легенів.

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 радіаційного 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 доз і середні дози опромінення населення Землі від них такі (в 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 K-40) | (0,2–0,8) | 0,3; |
| • разом | (1,0–10,0) | 2,4. |

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

ІВ відіграють неоцінну роль у майже 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 застосовують 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 точки зору радіаційної безпеки.

Особливими джерелами можливого масштабного 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 випромінення.

Захист часом і відстанню буває найбільш економічно прийнятним. Проте, цілком зрозуміло, що цих факторів може бути не достатньо, щоб убезпечити повною мірою персонал від опромінення на рівнях, що не перевищують допустимі. 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 іонізівне випромінення. Захист може бути створений навколо джерела, обладнання і/чи приміщення. В першому випадку захисний кожух оточує джерело, як наприклад, ікс-променеу 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 брутального 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 одночасно контролю якості проведення рентгенологічних досліджень у даному рентгенівському кабінеті. Доза опромінення хворих при променевої терапії приписується лікарем 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 гаммадефектоскопія стали загальноприйнятим методом 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 ладу. І нарешті, контрольовані вироби на таких установках характеризуються надто широким варіюванням за розмірами, конструкцією, матеріалами і рівнем забезпеченої надійності, що створює значний рівень фізичного і психологічного навантаження операторів таких установок. Узагальнено і коротко можна стверджувати, що найкращий варіант забезпечення 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 непроста проблема захисту від нейтронів, і, по-друге, вартість захисних конструкцій проти випромінювання таких енергій висока. 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

дослідженнях і промисловості для контролю деяких процесів. Застосування радіоактивних матеріалів пов'язане з ризиками не тільки зовнішнього опромінення людей, але і можливістю потрапляння їх 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. Використовують спеціальні герметичні шафи для роботи з такими джерелами і, по можливості, автоматизацію робіт.

Закриті радіоактивні джерела. Такі джерела іонізуючих випромінень різних типів за використовуваними радіонуклідами, призначенням, інтенсивністю випромінення, 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 промислових підприємствах, в медицині і побуті. Не рідко трапляються втрати подібних джерел через недбальство чи невдалу конструкцію пристрою, у який вмонтована радіонуклідна капсула. Подальша доля герметичних джерел буває самою 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 тієї фатальної знахідки. Ще одна наразі актуальна проблема, пов'язана з 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 відслідковувати долю тільки тих джерел, які призначені для відкритої практики.