

## ЛЕКЦІЯ 1.

### ПОНЯТТЯ РАДІОАКТИВНОСТІ, ЙОГО ДЖЕРЕЛА.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ВИДИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

##### Радіоактивність. Типи радіоактивного розпаду

Радіоактивність — це самовільне перетворення (розпад) нестійких ядер атомів деяких хімічних елементів, яке призводить до зміни їх атомного номера і масового числа. Розпад радіоактивних ядер супроводжується виділенням енергії у вигляді іонізуючих випромінювань. Такі елементи називаються *радіоактивними*.

Іонізуючими називаються випромінювання взаємодія яких з атомами і молекулами середовища приводить до утворення позитивно і негативно заряджених іонів, тобто до *іонізації речовини*.

Іонізація атомів або молекул виникає тоді, коли енергія, яка передається іонізуючій частинці, або фотону, вища за енергію зв'язку електрона з ядром. Для повітря цей показник у середньому становить 34 еВ, для більшості речовин, які входять до складу організмів, — від 10 до 65 еВ.

Атом—це найменша частинка хімічного елемента, що являє собою систему з позитивно зарядженого ядра та негативно заряджених електронів, які рухаються навколо нього. Ядро атома складається з протонів і нейтронів.

*Радіоактивні атоми* — нестійкі атоми елемента, які самовільно перетворюються на атоми іншого елемента, це супроводжується іонізуючим випромінюванням, або радіоактивністю.

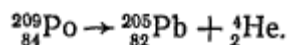
Поняття «радіоактивні атоми», «радіоактивні елементи», «радіоактивні речовини», «радіоактивні ізотопи», «радіонукліди» розрізняються між собою, але нерідко використовуються як синоніми, що не зовсім правильно.

Радіоактивність відкрита в 1896 р. А. Беккерелем, який встановив, що уран випромінює невідомі на той час промені. Це випромінювання було названо *променями Беккереля*.

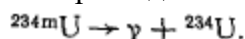
Склад іонізуючих променів Беккереля розшифрував англійський фізик Е. Резерфорд у 1899 р. Коли він пропустив їх крізь сильне магнітне поле, то помітив, що частина променів відхилилась до негативного полюса, тобто ці промені мали позитивний заряд. Він назвав їх *альфа-променями*. Частина променів, які відхилились до позитивного полюса і мали негативний заряд, дістали назву *бета-променів*. Промені, які не відхилились від початкового шляху, а отже, не мали заряду, були названі *гамма-променями*.

В результаті вивчення радіоактивності урану та радію Ф. Содді (1913) встановив, що ядра цих важких елементів зазнають перетворення двох типів — альфа- та бета-розпади. Пізніше виявилось, що бета-розпад існує у трьох різновидах: бета(-)-розпад, бета (+)-розпад, або позитронний, і К-захоплення.

**Альфа-розпад** характерний для трансуранових елементів. При цьому з ядра вилітає цілий блок частинок, які складаються з двох протонів і двох нейтронів і являють собою ядро атома гелію або альфа-частинку. Випустивши альфа-частинку, атом радіоактивного елемента перетворюється на атом іншого елемента, атомний номер його зменшується на 2, а атомна маса — на 4. Знову створений дочірній елемент розміщується в таблиці Менделєєва на дві клітинки ліворуч від материнського. Наприклад, полоній-209 перетворюється на свинець-205:



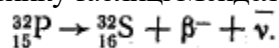
При альфа-розпаді можуть виникати збуджені, або метастабільні, ядра, які, переходячи в основний стан, випускають гамма-кванти, як наприклад метастабільний уран-234:



Маси атомів знову створених елементів не завжди збігаються з атомною масою елемента, зазначеного в таблиці Менделєєва, тобто виникають різновиди даного елемента — *ізотопи*.

**Бета(-)-розпад** настає тоді, коли число нейтронів в ядрі більше, ніж потрібно для стабільності ядра. При бета-розпаді один із внутрішніх нейтронів перетворюється на протон, а з ядра виділяються  $\beta^-$ -частинка (або електрон *ядерного походження*) і антинейтрино  $\bar{\nu}$ . При цьому атомний номер елемента збільшується на одиницю і дочірній елемент переходить вправо в сусідню

клітинку таблиці Менделєєва. Наприклад, перетворення фосфору, в сірку можна зобразити так:

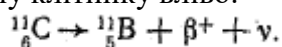


При бета-розпаді сумарна енергія  $\beta^{-}$ -частинок та антинейтрино дорівнює величині енергії зв'язку, що характерна для даного ізотопу. Якщо антинейтрино забирає більшу частину енергії, то енергетично  $\beta^{-}$ -частинка дістає менше енергії, і навпаки, тому енергія  $\beta^{-}$ -частинки одного й того ж радіонукліда неоднорідна, їх енергетичний спектр суцільний або неперервний. Середня енергія частинки в спектрі дорівнює приблизно третині максимальної енергії, і її зазначають при енергетичній характеристиці  $\beta^{-}$ -частинки.

Часто при бета-розпаді дочірнє ядро має надлишок енергії, тобто перебуває у збудженому, або метастабільному, стані. Надлишкова енергія виділяється з ядра у вигляді кванта електромагнітного випромінювання —  $\gamma$ -квантів, і ядро атома переходить у стабільний стан.

Розрізняють чисті бета-випромінюючі нукліди ( ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{32}\text{P}$ ,  ${}^{45}\text{Ca}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$  та ін.) і мішані бета- і гамма-випромінюючі нукліди ( ${}^{24}\text{Na}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{144}\text{Ce}$  та ін.).

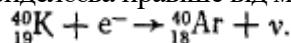
Позитронний розпад супроводжується вильотом позитрона ( $e^{+}$ ,  $\beta^{+}$ ) з ядра, в якому є *надлишок протонів*, наприклад,  ${}^{11}\text{C}$  ( $5n+6p$ ). При цьому протон перетворюється на нейтрон з випуском позитрона та нейтрино ( $\nu$ ). Атомний номер елемента зменшується на одиницю, і він зміщується на одну клітинку вліво:



Позитрон—це античастинка електрона. Вилетівши з ядра, він зриває з оболонки атома електрон, утворюючи при цьому пару позитрон-електрон, яка швидко перетворюється на 2  $\nu$ -кванти з енергією електрона. Відбулася *анігіляція*—перетворення речовини в поле, перетворення одного виду енергії в інший:

$$e^{+} + e^{-} \\ E_{\gamma} = 0,511 \text{ MeV.} \quad E_{\nu} = 0,511 \text{ MeV.}$$

**К-захоплення**, або електронне захоплення, спостерігається у нейтронодефіцитному ядрі тоді, коли у збудженому ядрі немає енергії, достатньої для позитронного розпаду. Ядро атома звільняється від надлишкових протонів, захоплюючи електрон з ближчого до ядра К-шару (іноді й L-шару). Надлишковий протон, який з'єднався з електроном, перетворюється на нейтрон і нейтрино, масове його число при цьому те саме, а змінюється лише заряд ядра або кількість протонів, і утворюється новий елемент, розміщений у таблиці Менделєєва правіше від материнського на одну клітинку:



У цьому разі ядерне перетворення відбувається з виділенням з ядра тільки нейтрино. Під час переходу з одного шару в інший з атома виділяється енергія у вигляді характеристичного випромінювання.

Отже, при розпаді радіоактивних елементів виникає *випромінювання* альфа- і бета-частинок (електронів і позитронів), гамма і характеристичне випромінювання.

Радіоактивний розпад ядер хімічних елементів є складним процесом. Дочірні елементи, що утворилися при розпаді ядер, можуть мати нестійкі ядра або ядра, які перебувають у збудженому стані. Нестійкі ядра дочірніх елементів розпадаються за одним з основних типів розпаду, а збуджені — випускають  $\gamma$ -квант і переходять в основний, або стабільний, стан. Кожний радіонуклід має свою специфіку ядерних перетворень, яку прийнято відображати у вигляді схеми розпаду.

Під час спостережень за розпадом ядер радіоактивних елементів було помічено, що радіоактивний розпад здійснюється під дією внутрішньоядерних процесів, темп його і характер не змінюються у звичайних умовах дії. Кожний атом розпадається спонтанно, але в достатній кількості речовини за однакові проміжки часу розпадається певна частина ядер. Чим більше розпадається радіоактивних ядер за одиницю часу, тим інтенсивніше випромінювання, або активність радіонукліда.

### Активність радіонуклідів, одиниці її вимірювання

*Активність радіонукліда* — це кількість атомів радіоактивного елемента, які розпадаються за одиницю часу, міра кількості радіоактивної речовини, виражена кількістю радіоактивних перетворень за одиницю часу.

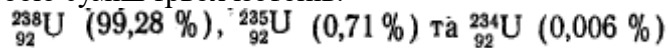
Швидкість розпаду атомів кожного радіонукліда залежить від двох взаємопов'язаних величин: сталої розпаду ( $\lambda$ ) та періоду напіврозпаду ( $T$ ).



$^{40}\text{K}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ . Ці радіонукліди перебувають у постійній рівновазі в земній корі.

Третю групу становлять космогенні радіонукліди, які безперервно утворюються в атмосфері Землі під дією космічного випромінювання з атомами (ядрами) азоту, кисню, аргону. До них належать  $^3\text{H}$  (тритій),  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  та деякі інші, які потрапляють на земну поверхню з атмосферними опадами. Саме вони визначають радіоактивність атмосфери разом з газоподібними продуктами розпаду урану і торію — радоном ( $^{222}\text{Rn}$ ) і тороном ( $^{220}\text{Rn}$ ), що містяться у нижніх її шарах. З 80 радіоактивних ізотопів 25 хімічних елементів, які є в земних породах, рудах, воді й атмосфері, практичне значення мають лише деякі, переважно довгоживучі радіонукліди. Радіонукліди, строк життя яких вимірюється частками секунди або секундами, мають лише теоретичне значення, допомагаючи зрозуміти механізми перетворення одних елементів в інші.

Серед радіоактивних елементів першої групи найпоширеніший в земній корі уран і торій. Природний уран являє собою суміш трьох ізотопів:



їх добувають з уранових руд, які містять більш як 0,1 % оксиду урану. Відносно багато урану в гранітах (на 1 т граніту припадає до 4 г урану), є він також у деяких бітумізованих смолах, асфальті, нафті, ґрунті. В 10 т ґрунту міститься близько 1 г урану, з них лише 3 % у рухомій формі. Уран є ядерним паливом, матеріалом для синтезу плутонію, еталоном для радіометрії  $\alpha$ -випромінювань.

Проміжні продукти розпаду ядер урану і торію — радій-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) і радон-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ;  $^{220}\text{Rn}$ ) — набули широкого застосування в медицині. Радій-226 застосовують у променевої терапії пухлин шкіри, а радон — для радонових ванн у концентрації 37—3700 Бк/л. Концентрація радію в рослинах дуже мала ( $n \cdot 10^{-3}$  Бк/кг), у більших концентраціях його знаходять у воді ( $\sim 0,05$  Бк/кг<sup>3</sup>) та кістковій тканині ссавців ( $\sim 0,04$  Бк/кг). При розпаді 1 г радію за добу утворюється 1 см<sup>3</sup> радону-222.

Радон є складовою частиною повітря. Його концентрація в повітрі коливається від 0,02 до 9,655 Бк/м<sup>3</sup>. Середній рівень радону в повітрі, за даними Наукового комітету по дії атомної радіації, створеного при ООН (НКДАР ООН), становить близько 2 Бк/м<sup>3</sup>. Радон в 7,5 раза важчий за повітря і нагромаджується поблизу поверхні землі, в підвалах будівель. Чим вища герметизація приміщення, тим більша в них концентрація радону, оскільки при цьому утруднюються циркуляція повітря і вихід радіоактивного газу з приміщення.

У споруди радон потрапляє також з будівельних матеріалів. У гранітах, пемзі, глиноземах, кальцій-силікатному шлаці, які використовуються в будівництві, рівні природних радіоактивних елементів вищі, більша в них і концентрація радону. За оцінками НКДАР ООН (1985), середня радіоактивність деревини становить 1 Бк/кг, гіпсу—29, піску і гравію — до 34, цементу —45, цегли — 126, граніту—170, глинозему — 340—496, кальцій-силікатного шлаку — 2140 Бк/кг.

Вміст радону у воді коливається в межах від 1,5 до 100 МБк/м<sup>3</sup>. Особливо високі концентрації радону у воді артезіанських свердловин. При кип'ятінні радон випаровується, тому потрапляє в організм переважно з некип'яченою водою.

З великої кількості радіоактивних елементів другої групи, які не входять до радіоактивних родин, практичне значення мають калій-40 і рубідій-87. Калій-40 є мішаним випромінювачем. При розпаді ядер цього радіонукліда виділяються бета-частинки з енергією 1,325 МеВ (89,8 %), гамма-кванти з енергією 2,461 МеВ, вихід яких становить 10,67 % на розпад. Період напіврозпаду його  $1,28 \cdot 10^9$  років. Він поширений у природі і є постійною домішкою (0,0119%) нерадіоактивного калію-39. В земній корі міститься 2,6 % калію, в тому числі 3,51(Н % радіоактивного калію-40. На 1 кг калію припадає 27343 Бк  $^{40}\text{K}$  (739 нКи/кг). Концентрація калію-40 у ґрунтах досягає 1480 Бк/кг і залежить від типу ґрунту та кількості внесених у нього калійних добрив. Кількість калію-40 у воді річок та озер коливається в межах від 0,005 до 0,028 Бк/л.

Вміст калію у тканинах рослинних і тваринних організмів досягає сотих і десятих часток процента від їх маси. З вищих рослин найбільше містять калію буряки, картопля, соняшник. Вміст калію в організмі ссавців становить 0,2 % маси тіла. Найбільш збагачені калієм м'язи серця, скелетні м'язи, печінка, селезінка, еритроцити.

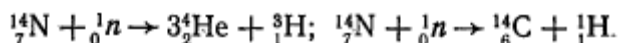
Природна радіоактивність рослинних організмів, зумовлена  $^{40}\text{K}$ , коливається в межах від 1,8

до 400 Бк/кг, а м'язової тканини ссавців — від 70 до 115 Бк/кг.

Рубідій-87 становить 27,85 % маси природного елемента. Енергія його  $\beta^-$ -частинок дорівнює 0,275 МеВ,  $\gamma$ -квантів — 0,394 МеВ, період напіврозпаду —  $6,15 \cdot 10^{10}$  років. Рубідій є антагоністом калію. У деяких рослинах і плодах може нагромаджуватись у значній кількості: 1 л виноградного соку містить 1 мг рубідію. В організмі ссавців концентрація рубідію становить 9,20—26,7 мкг/кг.

Космічні радіонукліди, на відміну від перших двох груп радіоактивних речовин, містяться в повітрі в дуже малій кількості. Їх концентрація стала і становить  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Серед великої кількості космічних радіонуклідів практичне значення мають тритій ( $^3\text{H}$ ) і важкий вуглець ( $^{14}\text{C}$ ). Вони утворюються з атмосферного азоту при бомбардуванні його ядер нейтронами за схемою

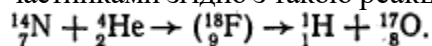


Тритій ( $^3\text{H}$ ) — м'який бета-випромінювач, його енергія становить 0,018 МеВ, період напіврозпаду 12,46 року. Тритію у природній суміші водню дуже мало ( $5 \cdot 10^{-16}$  %). За вмістом тритію визначають вік вин, соків, давність нагромадження підземних вод.

Вуглець-14 — це чистий бета-випромінювач. Максимальна енергія бета-частинок дорівнює 0,167 МеВ, період напіврозпаду 3570 років. З киснем утворює оксид вуглецю (IV) і в суміші з СО<sub>2</sub> бере участь у фотосинтезі, рослин та обміні речовин у тварин. Усі живі організми містять у своєму складі вуглець, в тому числі і конкретну концентрацію  $^{14}\text{C}$ , яка дорівнює 266,4 Бк на 1 кг вуглецю. З припиненням обміну речовин у зв'язку з загибеллю рослинних і тваринних організмів припиняється нагромадження  $^{14}\text{C}$  у тканинах і з часом його концентрація в них зменшується. За результатами вмісту  $^{14}\text{C}$  у викопних рештках встановлюють їх вік. Так працює «вуглецевий годинник».

**Штучні радіоактивні елементи.** Штучні радіонукліди одержують в результаті ядерних реакцій, що здійснюються бомбардуванням ядер атомів стабільних хімічних елементів частками високих енергій ( $\alpha$ -частинками, електронами, протонами, ядрами інших елементів) або в результаті реакцій активації, поділу та синтезу.

Перший штучний радіоактивний елемент кисень одержав англійський фізик Е. Резерфорд у 1919 р. при бомбардуванні ядер азоту  $\alpha$ -частинками згідно з такою реакцією:



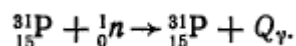
Проникнення в ядро азоту  $\alpha$ -частинки призводить до утворення нестійкого ядра фтору, яке перетворюється на ядро кисню з випуском протона.

У 1934 р. І. Кюрі та Ф. Жоліо-Кюрі бомбардуванням бору, магнію та алюмінію  $\alpha$ -частинками полонію одержали радіоактивні нукліди азоту  $^{13}_7\text{N}$ , кремнію  $^{28}_{14}\text{Si}$ , фосфору  $^{30}_{15}\text{P}$ . Вони назвали це явище *штучною радіоактивністю*, а добути елементи — *штучними радіоактивними елементами*.

У наступні роки було зазначено, що для одержання штучних радіонуклідів можна використовувати не тільки  $\alpha$ -частинки, а й протони, електрони, ядра інших елементів, їх добувають у прискорювачах різних легких частинок та важких іонів — синхрофазотронах, синхротронах, бетатронах та інших, де вони прискорюються під дією постійного електричного або перемінного електромагнітного поля. Енергія частинок та іонів може досягати кількох сотень або десятків мільярдів електрон-вольт. Володію-

чи такою енергією, частинки та ядра елементів взаємодіють з ядрами стабільних елементів, викликаючи в них ядерні реакції. При цьому ядро стабільного елемента перетворюється на інше стабільне або радіоактивне. Так утворюються  $^8\text{H}$ ,  $^7\text{B}$ ,  $^{14}\text{H}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{56}\text{Co}$  та багато інших, які використовують у різних сферах народного господарства, медицині, наукових дослідженнях.

Штучні радіонукліди можна добути бомбардуванням ядер стабільних елементів нейтральними частинками — нейтронами. Вільні нейтрони, маючи достатню масу і не маючи заряду, не відштовхуються ядром, а безперешкодно входять у нього, зумовлюючи перебудову ядра. При цьому ядро-мішень стабільного елемента перетворюється на власний радіоактивний нуклід, як наприклад, це відбувається з ядром стабільного фосфору, яке втрачає частину надлишкової енергії з  $\gamma$ -квантом:



Ця реакція дістала назву радіаційного захвату, або *реакції активації*. Вона зумовлюється повільними нейтронами ( $E_n$  до 100 еВ).

Нейтрони при взаємодії з ядрами деяких важких елементів можуть спричинити *реакцію поділу*.

Процес поділу починається з того, що нейтрон, потрапивши в ядро, збільшує його масове число на одиницю ( $^{235}\text{U}$  перетворюється на  $^{236}\text{U}$ ). Ядро стає енергетично нестійким і приблизно за  $10^{-12}$  с ділиться на два ядра-уламки, сума заряду яких дорівнює зарядовому числу ядра-мішені. При поділі ядер трансуранових елементів виникають несиметричні уламки ядер, які різняться за масою (їх відношення нерідко становить 3:2). Таких уламків при поділі ядер урану-235 утворюється більш як 80, їх кінетична енергія становить 168 МеВ. При цьому виділяється велика кількість енергії. Поділ 1 г  $^{235}\text{U}$  супроводжується виділенням близько 7,2 ГДж теплової енергії. Кожний акт поділу супроводжується вильотом 2—3 вільних нейтронів, при цьому виділяється гамма-випромінювання.

Ланцюгова реакція поділу можлива, якщо розпад ядра спричинює утворення двох і більше нейтронів і якщо маса речовини більша за критичну. За такої умови вільні нейтрони зустрічають на своєму шляху інші важкі ядра, здатні до поділу, і виникає процес, що самостійно розвивається,— ланцюгова реакція поділу, яка призводить до ядерного вибуху. В першому акті поділу беруть участь два ядра, в третьому — 8, у 20-му — мільйон, у 60-му —  $10^{12}$  ядер.

Якщо число нейтронів, які утворилися в результаті поділу, вдається регулювати за допомогою речовин, що поглинають нейтрони (бору, графіту, води тощо), і довести їх до 1,2—1,5, то ланцюгова реакція перетворюється на керовану реакцію поділу. Керовану реакцію поділу урану-235 та урану-238 використовують для виробництва електричної енергії на атомних електростанціях (АЕС) і добування з відпрацьованого палива штучних радіонуклідів.

Нині відомо 1950 радіоактивних нуклідів: 70 з них — натуральні, а 1880—штучні, добуті в ядерно-енергетичних установках, ядерних реакторах та прискорювачах елементарних частинок. Приблизно 168 ізотопів 80 хімічних елементів випускаються атомною промисловістю для практичного використання. У сільському господарстві використовують близько 30 радіонуклідів. Всі натуральні і штучні радіонукліди — це джерело іонізуючих випромінювань.

### **Види іонізуючих випромінювань і їх взаємодія з речовиною.**

Розрізняють два види іонізуючих випромінювань — електромагнітне й корпускулярне. Всі вони мають енергію, достатню для іонізації атомів і молекул речовини. Вони невидимі і можуть проникати крізь непрозорі тіла! викликаючи різні зміни в біологічних системах. Тому їх називають *проникаючою радіацією*.

Проходячи крізь речовину, іонізуюче випромінювання витрачає свою енергію на іонізацію і збудження зустрічних атомів і молекул і поглинається цією речовиною. Відстань, яку встигає пройти заряджена частинка або квант до того, як її енергія дорівнюватиме нулю, називають *пробігом*. Енергію, яка втрачається зарядженою частинкою або фотоном електромагнітного випромінювання на одиницю їх пробігу в речовині, називають *лінійною передачею енергії* (ЛПЕ); в СІ її виражають в джоулях на метр (Дж/м).

У радіобіології більше використовують спеціальні одиниці й ЛПЕ виражають частіше в кілоелектрон-вольтах (кеВ) на мікрометр шляху у воді ( $1 \text{ кеВ/мкм} = 0,16 \text{ нДж/м}$ ).

ЛПЕ характеризує швидкість втрати енергії за одиницю шляху і залежить від енергії фотонного випромінювання, заряду маси та швидкості частинок. Ця залежність різко збільшується із зменшенням швидкості частинок та збільшенням їх маси.

Від швидкості втрати енергії залежать ефекти біологічної дії різних видів випромінювання, із збільшенням значень ЛПЕ зростає відносна біологічна ефективність (ВБЕ) випромінювань. Для кожного виду випромінювань характерний свій спосіб взаємодії з речовиною.

**Електромагнітне випромінювання.** Електромагнітне, або фотонне, іонізуюче випромінювання являє собою потік періодичних електричних коливань, які відрізняються від радіохвиль, інфрачервоного, видимого та ультрафіолетового світла коротшою довжиною хвилі та вищою енергією. До нього відноситься гамма-випромінювання, а також рентгенівське випромінювання, яке складається з гальмуючого й характеристичного випромінювань.

Електромагнітне випромінювання має квантову природу, його випускають атоми певними порціями (квантами). Фотон не має маси спокою і елементарного заряду. Характерною для нього є стала швидкість руху, яка дорівнює швидкості руху світла; частота електромагнітних коливань,

або довжина їх хвилі, з якими пов'язане значення енергії окремих квантів.

Енергія фотона залежить від частоти електромагнітних коливань ( $\nu$ ) або від довжини хвилі випромінювання ( $\lambda$ ), зв'язок між якими визначається простим відношенням

$$\nu = \frac{\text{швидкість світла}}{\text{довжина хвилі}} = c/\lambda.$$

У квантовій теорії приймається, що енергія електромагнітного випромінювання прямо пропорційна його частоті:

$$E = h\nu = h' \frac{c}{\lambda}$$

де  $h$  — стала Планка, одна з основних фізичних констант, яка дорівнює  $6,62607 \cdot 10^{-34}$  Дж·с ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

Отже, якщо відома довжина хвилі електромагнітного випромінювання, то можна визначити його енергію, і навпаки, за енергією кванта можна визначити довжину його хвилі, яка лежить в межах  $10^{-7}$ — $10^{-12}$  м.

Гамма-випромінювання — це електромагнітне випромінювання високої енергії, яка випускається ядрами. Воно є тим механізмом, за допомогою якого збуджені ядра повертаються в основний стан. При альфа- і бета-розпаді час життя збуджених ядер вимірюється частками секунди, годинами, рідше добами, тобто при спонтанному розпаді великої кількості ядер виділення  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -квантів відбувається практично одночасно.

Слід зазначити, що  $\gamma$ -випромінювання не змінює масового числа і заряду ядра. Енергія  $\gamma$ -квантів перевищує 0,1 МеВ, довжина їх хвилі  $10^{-11}$ — $10^{-12}$  м.

Енергія квантів, що випускаються ядрами після альфа-розпаду, не перевищує 0,5 МеВ, а після бета-розпаду — 2—2,5 МеВ. При анігіляції електронно-позитронних пар вона становить 0,511 МеВ. В середньому енергія  $\gamma$ -випромінювань різних радіоактивних елементів коливається від 0,1 до 3 і рідко досягає 10 МеВ.

Гамма-кванти з енергією до 1 МеВ створюють *м'яке*, а з енергією більш як 1 МеВ — *жорстке* випромінювання. З жорстким випромінюванням  $\gamma$ -кванти утворюють лінійний спектр випромінювання, постійний для кожного елемента. Багатоенергетичне випромінювання характерне лише для деяких  $\gamma$ -випромінювальних радіонуклідів ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{62}\text{Mn}$ ,  $^{141}\text{La}$ -та ін.), тому завжди визначають їх середню енергію ( $E$ ).

Другим джерелом електромагнітного випромінювання є гальмує випромінювання, яке виникає під час Гальмування заряджених частинок в електричному полі ядра атома. Як правило, воно має безперервний енергетичний спектр. Прикладом такого випромінювання можуть бути рентгенівські промені, які виникають на аноді рентгенівської трубки в результаті бомбардування його високоенергетичними електронами. Рентгенівське випромінювання виникає при напрузі 15—250 кВ, яка подається на анод рентгенівської трубки. Більшість фотонів гальмуючого випромінювання має набагато менше енергії, ніж енергія на аноді; але максимальна енергія гальмуючого випромінювання дорівнює енергії електрона або напрузі, яка передається на анод.

Довжина хвилі рентгенівського випромінювання  $10^{-7}$ — $10^{-11}$  м. Умовно рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі менш як  $2 \cdot 10^{-10}$  м називають *жорстким*, а з довжиною хвилі більш як  $10^{-10}$  м — *м'яким*. Основним джерелом рентгенівського випромінювання є рентгенівські апарати, які широко використовуються у медичній та ветеринарній діагностиці, рідше — в променевої терапії. На початку розвитку радіобіології їх використовували як джерело зовнішнього опромінення біологічних об'єктів. Нині в експериментальних дослідженнях ці апарати застосовуються рідко.

Гамма-кванти, не маючи заряду і маси спокою, зумовлюють послаблену іонізуючу дію, створюють 2—6 пар іонів на 1 см пробігу в повітрі. Залежно від величини енергії вони при взаємодії з речовиною можуть зумовлювати такі ефекти:

а) фотоелектричне поглинання — вибивання електронів з внутрішньої оболонки атома з передачею їм усієї своєї енергії;

б) комптонівський ефект — вибивання електронів із зовнішньої електронної оболонки атома з передачею їм частини своєї енергії і *змінюю напрямку руху фотона* — розсіювання  $\gamma$ -квантів;

в) виникнення пари — перетворення  $\gamma$ -кванта під дією сильного електричного поля ядра атома в пару електрон-позитрон з наступною їх *анігіляцією*.

Вид взаємодії  $\gamma$ -квантів з речовиною визначається величиною їх енергії та атомним номером речовини, що опромінюється. По всіх трьох видах взаємодії « $\gamma$ -випромінювання з речовиною в кінцевому підсумку утворюються швидкі вторинні електрони, які створюють основну іонізацію атомів середовища, а також характеристичне випромінювання.

У біологічних тканинах поглинання фотонного випромінювання, яке має енергію 0,05—1,022 МеВ, відбувається переважно за рахунок комптон-ефекту. Фотоелектричний ефект зумовлює випромінювання з енергією, меншою за 0,05 МеВ, що характерно для м'якого рентгенівського та  $\gamma$ -випромінювання. Ефект виникнення пар спостерігається тільки тоді, коли енергія  $\gamma$ -кванта дорівнює 1,022 МеВ і речовина, з якою він взаємодіє, має велику атомну масу. В біологічній тканині цей ефект виникає рідко.

Оскільки ймовірність зустрічі  $\gamma$ -квантів з електронами і ядром атома мала, вони мають велику проникаючу здатність. У повітрі  $\gamma$ -кванти проходять шлях, що становить кілька сот метрів, у деревині — більш як 25 см, у свинці — понад 5 см, у воді — десятки метрів, а живі організми вони пронизують наскрізь і є для них небезпечними як джерело зовнішнього опромінення. ЛПЕ  $\gamma$ -квантів з енергією 1,3 МеВ дорівнює 0,3 кеВ, а при енергії 250 кеВ вона становить 2,2 кеВ/мкм. У ролі джерела  $\gamma$ -квантів у біологічних дослідах використовують радіонукліди  $^{60}\text{Co}$  та  $^{137}\text{Cs}$ .

Після проходження крізь речовину інтенсивність потоку  $\gamma$ -випромінювання послаблюється. Лнійне послаблення  $\gamma$ -випромінювання є досить складним процесом, який залежить від енергії кванта, густини речовини, що опромінює. Чим вища густина цієї речовини (її атомна маса) і менша енергія кванта, тим інтенсивніше він поглинається. Тому для захисту від  $\gamma$ -випромінювання застосовують речовину і матеріали з великою атомною масою — свинець, сталь та ін.

**Корпускулярне випромінювання.** Корпускулярне випромінювання — це потік елементарних частинок, або корпускул, які характеризуються такими величинами, як маса спокою, наявність або відсутність заряду, початкова енергія, яка залежить від швидкості руху частинок. До них належать бета-частинки, або електрони ядерного походження, позитрони, альфа-частинки, протони, нейтрони, пі-мезони, дейтрони - ядра ізотопу водню дейтерію, багато інших частинок, маса спокою яких відрізняється від нуля.

Розглянемо лише ті елементарні частинки, які мають значення в радіобіології,— альфа-, бета-частинки, нейтрони.

**Альфа-частинки** — це потік позитивно заряджених ядер атомів гелію, які складаються з двох протонів і двох нейтронів, мають подвійний заряд атомну масу 4,003 а. о. м. та швидкість польоту у вакуумі  $9,25 \cdot 10^3$  км/с. їх енергія коливається в межах 2—11 МеВ. Енергетичний спектр  $\alpha$ -частинок монохроматичний або має невеликий набір дискретних енергій, характерний для кожного елемента з альфа-випромінюванням.

Пробіг  $\alpha$ -частинок у речовині пропорційний її енергії і обернено пропорційний густині речовини. Свою енергію  $\alpha$ -частинки затрачають переважно на непружні співударі з електронами речовини і рідше — на пружні співударі з ядрами. При пружних співударах кінетична енергія часто не губиться, а зміщується тільки траєкторія її руху, тобто відбувається розсіювання  $\alpha$ -частинок. При непружному співударі (розсіюванні) кінетична енергія  $\alpha$ -частинки втрачається на іонізацію та збудження атомів і молекул, а напрям її руху практично не змінюється. Отже,  $\alpha$ -частинка рухається прямолінійно

Енергія виникнення однієї пари іонів у повітрі становить близько 34 еВ, так що при проходженні  $\alpha$ -частинки урану-238 з енергією 4,2 МеВ до моменту її поглинання виникає близько  $10^5$  пар іонів. На кінці шляху  $\alpha$ -частинки, де вона має меншу енергію, питома іонізація досягає більшого значення (близько 7000 пар на 1 мм шляху), ніж на початку шляху (3000 пар іонів на 1 мм шляху).

Для  $\alpha$ -частинок максимальне значення ЛПЕ досягає 260 кеВ/мкм. Шлях пробігу  $\alpha$ -частинки до повної втрати енергії досягає в повітрі 10 см, у воді, біологічній тканині — 0,1 - 0,015 мм. Витративши свою енергію,  $\alpha$ -частинка приєднує два електрони і перетворюється в атом гелію.

**Бета-частинки** — потік негативно заряджених електронів ядерного походження, які випускаються ядрами радіоактивних елементів при їх бета-розпаді. їх маса дорівнює масі електрона (0,00548 а. о. м., або  $9,106 \cdot 10^{-31}$  г). Енергія  $\beta$ -частинок різних природних і штучних радіоактивних елементів має широкі межі — від 0,0015—005 МеВ (м'яке випромінювання  $\beta$



-частинок) до 3, рідше 12 MeV (жорстке бета-випромінювання). При бета-розпаді ядра разом з  $\beta$ -частинкою виділяється антинейтрино і енергія зв'язку ядра розподіляється між ними мимовільно, тому величина енергії  $\beta$ -частинок одного і того ж елемента неоднорідна, їх енергетичний спектр суцільний і безперервний. Середня енергія  $\beta$ -частинок у спектрі дорівнює приблизно  $1/3$  максимальної енергії і позначається  $E$ .

При взаємодії з середовищем  $\beta$ -частинка витрачає свою енергію на іонізацію і збудження зустрічних атомів (іонізаційні втрати) та на виникнення гальмівного випромінювання (радіаційні втрати), які збільшуються із зростанням атомної маси опроміненої речовини. Їх шлях у речовині звивистий, оскільки вони легко змінюють напрям руху під дією електричних полів зустрічних атомів (рис. 11, б). Пробіг  $\beta$ -частинок досягає в повітрі 25 м, у біологічній тканині — до 0,85 см. Вони створюють 50-100 пар іонів на 1 см шляху в повітрі. ЛПЕ  $\beta$ -частинки з середньою енергією 0,4 MeV дорівнює 0,25 кеВ/мкм. Вона збільшується в кінці пробігу.

Бета-частинки середніх енергій повністю поглинаються шаром алюмінію товщиною 5 мм і органічним склом. У зв'язку з розсіяним типом іонізації повного захисту при роботі з джерелами бета-випромінювання не існує. При зовнішній дії великої кількості  $\beta$ -частинок можуть виникнути бета-опіки листків рослин і шкіри, кришталика ока. Особливо небезпечні вони при потраплянні в організм.

**Нейтрони** — це електрично нейтральні частинки ядер атомів усіх елементів, крім вуглецю. Вільні нейтрони виникають у природі або їх добувають у лабораторіях у результаті ядерних реакцій. Взаємодіючи з ядрами, нейтрони можуть розсіюватись на ядрах інших елементів (пружне і непружне розсіювання), зумовлювати реакції поділу важких ядер активації, зумовлюючи інколи утворення радіоактивних ізотопів.

При пружному розсіюванні на ядрах вуглецю, азоту, кисню та інших елементів, які входять до складу біологічної тканини, нейтрони втрачають близько 10—15 % енергії, тоді як при зіткненні з ядрами водню вони практично залишаються такими самими, як і нейтрони; енергія нейтронів зменшується удвічі, передаючись протону віддачі. Як результат такої взаємодії утворюються сильно іонізуючі протони (рис. 12).

У біологічних об'єктах нейтрони можуть спричинити наведену радіоактивність, що становить серйозну небезпеку як фактор біологічної дії.

Передача енергії нейтронів опромінованій речовині відбувається не прямо, а через утворення вторинних частинок (переважно ядер віддачі,  $\beta$ -частинок,  $\gamma$ -квантів). Отже, кінцевий біологічний ефект взаємодії нейтронів з речовиною пов'язаний з іонізацією, яку зумовлюють ці частинки і кванти.

Тип взаємодії нейтронів з атомними ядрами залежить від хімічного складу опромінованої речовини (від співвідношення в ній атомів різних елементів), а також від енергії нейтронів.

### Доза випромінювання та одиниці вимірювання

Мірою дії будь-якого іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти є величина поглинутої енергії випромінювання, або *доза випромінювання* — величина поглинутої енергії випромінювання на одиницю маси опроміненої речовини. В радіобіології розрізняють три види доз:

- 1) поглинута — кількість енергії будь-якого виду випромінювання, що поглинається одиницею маси;
- 2) експозиційна, або фізична,— кількість енергії рентгенівського, або  $\gamma$ -випромінювання, що поглинається одиницею маси повітря;
- 3) еквівалентна, або біологічна,— характеризує оцінку дії різних видів випромінювань на організм людини. Вона введена для нормування дозових навантажень при зовнішньому і внутрішньому опроміненні людини і для прогнозу біологічних ефектів.

Основною величиною, прийнятою в дозиметрії для оцінки міри дії випромінювання, є поглинута доза випромінювання.

**Поглинута доза** — це відношення величини енергії випромінювання ( $E$ ), що поглинається деяким об'ємом середовища, до маси ( $m$ ) цього об'єму, тобто  $D_p = E/m$ . Одиницею поглинутої дози в СІ є джоуль на кілограм (Дж/кг) або грей (Гр).

Грей дорівнює поглинутій дозі іонізуючого випромінювання, при якій речовині масою 1 кг передається енергія випромінювання 1 Дж (1 Гр = 1 Дж/кг).

Позасистемною одиницею поглинутої дози випромінювання є 1 рад, який дорівнює поглинанню 100 ерг енергії будь-якого іонізуючого випромінювання в 1 г опроміненої речовини: 1 рад=100 ерг/г=10<sup>-2</sup> Дж/кг =10<sup>-2</sup> Гр; 1 Гр=100рад.

**Експозиційна доза випромінювання** визначається рівнем іонізації повітря або кількістю енергії фотонного випромінювання\* яка використана на утворення в одиниці маси або об'єму повітря іонів, що несуть електричний заряд певної величини. Термін «експозиційна доза» встановлено для фізичної характеристики фотонного випромінювання з енергією від 1 кеВ до 3 МеВ.

В СІ одиницею експозиційної дози є кулон на кілограм (Кл/кг). Ця одиниця дорівнює експозиційній дозі, при якій у повітрі масою в 1 кг фотонне випромінювання утворює іони, що несуть електричний заряд в 1 Кл кожного знака.

Позасистемною одиницею експозиційної дози є рентген (Р) — експозиційна доза фотонного випромінювання, при якій в 1 см<sup>3</sup> повітря (0,001293 г) утворюються іони, що несуть одну одиницю електростатичного заряду кожного знака. При цьому мається на увазі, що заряджені частинки, які утворились під дією фотонного випромінювання, витрачають всю енергію на іонізацію. Дозі 1 Р відповідає утворення 2,08\*10<sup>9</sup> пар іонів в 1 см<sup>3</sup> повітря (при 0°С та 760 мм рт. ст.).

Між одиницями рентген і кулон на кілограм існує таке співвідношення:

$$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \times 10^3 \text{ Р};$$

$$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Враховуючи середню енергію утворення іонів, легко встановити енергетичний еквівалент рентгена.

Поглинута й експозиційна дози випромінювання пов'язані між собою таким співвідношенням; 1 Р у повітрі відповідає 0,88 рад, для біологічної тканини 1 Р =0,96 рад. Для того щоб перейти від експозиційної дози, яку вимірюють приладами, до поглинутої дози, треба величину дози в рентгенах помножити на коефіцієнт 0,96. Якщо, наприклад, експозиційна доза дорівнює 25 Р то поглинута становитиме 24 рада (25 Р\*0,96=24).

Експозиційна доза характеризує джерело і поле рентгенівського та γ-випромінювання. Вона є потенційно небезпечною для зовнішнього опромінення людини: людина може ввійти в це поле і поглинути певну дозу, а може і не входити в нього і не опромінюватись. Але поле з конкретною дозою залишається, тому цю дозу вимірюють дозиметричними приладами.

Поглинуту дозу при внутрішньому опроміненні можна визначити тільки за допомогою розрахунків, якщо відомі радіоактивний ізопад, його вміст в органах і тканинах організму, тривалість опромінення.

При наявності в об'єкті опромінення одночасно α-, β- і γ-випромінюючих ізотопів окремо обчислюють дозу кожного виду випромінювання і добути результати сумують.

Для розрахунку потужності поглинутої дози (Р) в 1г тканини від β-випромінюючих ізотопів з відомою активністю Д. М. Гродзінський (1984) запропонував таку формулу:

$$P = \frac{3,7 \cdot 10^4 \cdot E_{\beta} A}{6,22 \cdot 10^7} = 0,693 \cdot 10^{-3} \cdot E_{\beta} A, \text{ рад/с},$$

де 3,7·10<sup>4</sup> — кількість розпадів за секунду в одному мікрокюрі; E<sub>β</sub> — середня енергія β-частинки; A — активність ізопаду, мкКі; 6,22·10<sup>7</sup> — енергетичний еквівалент 1 рада, МеВ.

Приклад: визначити потужність поглинутої дози в 1 г тканини від інкорпорованого в ній 1 мкКі радіонуклідів <sup>14</sup>С (середня енергія <sup>14</sup>С дорівнює 0,0186 МеВ). . Розв'язання: Р — 0,693\*0,0186\*1\*10<sup>-3</sup>=0,011\*10<sup>-3</sup> рад/с

**Еквівалентна, або біологічна, доза випромінювання.** При опроміненні живих організмів виникають ефекти, які визначають ступінь радіаційної небезпеки. Для будь-якого виду іонізуючого випромінювання радіобіологічні ефекти, що спостерігаються, здебільшого прямо пропорційні поглинутій енергії. Але при одній і тій самій поглинутій дозі в тканинах організму біологічний ефект неоднаковий для різних видів іонізуючого випромінювання. Тому знання величини поглинутої дози недостатньо для оцінки міри радіаційної небезпеки. Прийнято порівнювати, біологічні ефекти, зумовлені будь-якими видами іонізуючих випромінювань, з біологічними ефектами, що спричинені рентгенівським випромінюванням, з енергією 220 кеВ і ЛПЕ, яка дорівнює 3 кеВ/мкм.

Рентгенівське випромінювання з енергією 220 кеВ прийнято називати *контрольним*, а для

порівняльної оцінки дії іонізуючих випромінювань на живий організм введено поняття *відносна біологічна ефективність* (ВБЕ) — відношення поглинутої дози контрольного випромінювання ( $D_p$ ), що зумовлює певний біологічний ефект, до поглинутої дози даного виду випромінювання ( $D_x$ ), яка спричинює той самий ефект:

$$\text{ВБЕ} = D_p / D_x.$$

Поняття ВБЕ рекомендується використовувати тільки в радіобіології, оскільки біологічний ефект залежить також від ряду характеристик організму, умов опромінення і розподілу поглинутої дози в різних органах і тканинах.

Для оцінки ефективності випромінювань в умовах великих об'єктів введено поняття *коефіцієнта якості* ( $K$ ). Цей коефіцієнт показує, у скільки разів радіаційна небезпека даного виду випромінювання більша, ніж контрольного рентгенівського випромінювання.

Значення коефіцієнта якості і ВБЕ випромінювань з різними величинами ЛПЕ наведено в табл. 2, з якої видно, що ВБЕ та  $K$  близькі, але не еквівалентні.

Рідкоіонізуючі випромінювання з меншим ступенем ймовірності поглинаються ядрами клітин, тому ВБЕ-випромінювань з ЛПЕ менш як 10 кеВ низька. При значеннях ЛПЕ, вищих за 10 кеВ/мкм, ВБЕ різко збільшується, а потім зменшується. Зменшення ВБЕ пояснюється неефективністю витрат енергії випромінювання при багаторазових іонізаціях, що виникають в ураженому ядрі.

**Еквівалентна доза** ( $D_H$ ) — це добуток поглинутої дози на середній коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання в елементарному об'ємі біологічної тканини стандартного складу:

$$D_H = D_p K.$$

Значення коефіцієнтів якості  $K$  для різних видів випромінювань наведено в табл. 3.

**Таблиця 3. Коефіцієнти якості різних видів іонізуючих випромінювань**

Вид випромінювання	$K$
Рентгенівське і $\gamma$ -випромінювання	1
Електрони і позитрони, $\beta$ -випромінювання	1
Протони з енергією 10 МеВ	10
Нейтрони з енергією 20 кеВ	3
Нейтрони з енергією 0,1—10 МеВ	10
$\alpha$ -випромінювання з енергією 10 МеВ	20
Важкі ядра віддачі	20

Одиниця еквівалентної дози в СІ — зіверт (Зв), що визначає кількість енергії будь-якого виду іонізуючого випромінювання, поглинуту 1 кг біологічної тканини, при якій спостерігається такий самий біологічний ефект, що й при поглинутій дозі в 1 Гр контрольного випромінювання.

Позасистемна одиниця еквівалентної дози — бер (біологічний еквівалент рентгена). Це енергія будь-якого виду випромінювання, поглинута 1 г біологічної тканини, при якій спостерігається такий самий біологічний ефект, що й при поглинутій дозі 1 рад контрольного випромінювання. Співвідношення між одиницями еквівалентної дози такі: 1 Зв=100 бер; 1 бер =  $10^{-2}$  Зв.

Розподіл еквівалентної дози в тканині при зовнішньому опроміненні організму досить нерівномірний. Для  $\gamma$ -випромінювання найбільша еквівалентна доза створюється поблизу поверхні тіла, для нейтронів — на глибині кількох сантиметрів від поверхні.

### **Потужність дози і види опромінення.**

У біологічному відношенні важливо мати інформацію не тільки про величину дози, одержаної опроміненням об'єктом, а й про швидкість її нагромадження, тому що однакова доза, одержана за різні проміжки часу, може спричинити неоднакові ушкодження. Для цього було введено поняття потужності дози.

**Потужність дози**  $P$  — це доза випромінювання  $D$ , віднесена до одиниці часу:

$$P = D/t.$$

Потужність дози прямо пропорційна швидкості нагромадження дози опромінення. В СІ одиницями потужності поглинутої дози є греї за секунду (Гр/с), експозиційної дози — ампер на кілограм (А/кг), еквівалентної дози — зіверт за секунду (Зв/с). Позасистемні одиниці потужності дози: поглинутої — рад за секунду (рад/с); експозиційної — рентген за секунду (Р/с);

еквівалентної — бер за секунду (бер/с).

Залежно від потужності дози розрізняють гостре і пролонговане, або хронічне, опромінення. Гострим вважають короткочасне опромінення протягом не більше 4 діб, пролонгованим — довгострокове опромінення протягом десятків діб, тижнів і навіть років. У першому випадку потужність дози висока (десятки, сотні грей за годину), в другому — низька (мізерні частки грей за годину).

Розрізняють також одноразове і багаторазове (фракціоноване) опромінення. При одноразовому опроміненні доза передається об'єкту опромінення протягом одного безперервного процесу, а при багаторазовому — розділяється на кілька фракцій, які чергуються з періодами, протягом яких організм не опромінюється.

Пролонговане й фракціоноване опромінення істотно відрізняється від гострого і одноразового за ефектом біологічної дії. Доза хронічного опромінення, що зумовлює однакові біологічні ефекти, може в 3—6 і більше разів перевищувати дозу гострого опромінення. Ефективність фракціонованого опромінення залежить як від кількості і тривалості фракцій, так і від інтервалу між ними. З їх збільшенням ефективність опромінення знижується, тому що в періоди між фракціями відновлюються порушені функції і структури клітин та організму в цілому.

Зниження ефективності опромінення із зменшенням потужності дози і при її фракціонуванні підтверджує існування процесів пострадіаційного відновлення живих організмів, опромінених іонізуючою радіацією. Фізичні властивості й характеристики іонізуючого випромінювання визначають вид радіобіологічної реакції організму на опромінення, або, як його ще називають, радіобіологічний ефект. Залежно від виду випромінювання, дози і способу опромінення можна спостерігати різні реакції організму на променеву дію: від прискорення росту і розвитку до його загибелі.

## Контрольні запитання

- 1) Яку будову мають електронні оболонки і ядра атома?
- 2) Яка природа іонізації та збудження атомів?
- 3) Що таке іонізація? Яка її фізична суть?
- 4) Які ви знаєте типи ядерного розпаду? Охарактеризуйте їх.
- 5) Яка активність радіонуклідів? її одиниці.
- 6) Що може бути джерелом радіоактивності?
- 7) Які природні радіоактивні елементи вам відомі?
- 8) Які ви знаєте штучні радіоактивні елементи? Як їх виробляють?
- 9) Які є види іонізуючих випромінювань?
- 10) Охарактеризуйте електромагнітні іонізуючі випромінювання.
- 11) Дайте загальну характеристику корпускулярних іонізуючих випромінювань.
- 12) Які є види електромагнітних іонізуючих випромінювань?
- 13) Які ефекти виникають при взаємодії електромагнітних випромінювань з речовиною?
- 14) Охарактеризуйте різні види корпускулярних випромінювань.
- 15) Поясніть іонізаційні та радіаційні втрати енергії корпускулярного іонізуючого випромінювання.
- 16) Що таке проникна здатність різних видів іонізуючих випромінювань?
- 17) Лінійна передача енергії (ЛПЕ) іонізуючих випромінювань.
- 18) Поняття про дозу і види доз іонізуючих випромінювань.
- 19) Поглинута доза та одиниці її вимірювання.
- 20) Експозиційна доза та одиниці її вимірювання.
- 21) Еквівалентна доза та принципи її розрахунку.
- 22) Що являє собою відносна біологічна ефективність (ВБЕ) випромінювань?
- 23) 23. Потужність дози та види опромінення.