

# ТЕМА 1. РАДІОБІОЛОГІЯ ЯК НАУКА. ПРЕДМЕТ, ЗАВДАННЯ, ІСТОРІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

1.1. *Визначення радіобіології як науки. Зв'язок радіобіології з іншими науками.*

1.2. *Загальна радіобіологія та радіоекологія.*

1.3. *Коротка історія радіобіології.*

1.4. *Основні методи дослідження в радіобіології.*

## 1.1. *Визначення радіобіології як науки*

**Радіобіологія** – це самостійна комплексна, фундаментальна наука, яка складається із багатьох наукових напрямів, що вивчають дію іонізуючих випромінювань на біологічні системи різних рівнів організації, в тому числі на живі організми та їх угруповання.

Будь-яка самостійна наукова дисципліна має чітко визначений об'єкт досліджень. Із визначення очевидно, що коло конкретних об'єктів, на яких досліджуються механізми впливу іонізуючих випромінювань, надзвичайно широке.

Радіобіологія досліджує реакції на опромінення будь-яких біологічних об'єктів - вірусів, бактеріофагів, клітинних органел, клітин, тканин, багатоклітинних організмів тваринного й рослинного світу, людини, видових популяцій, угруповань організмів і біосфери в цілому, а також вивчає механізми процесів, які спричиняють формування радіобіологічної відповіді клітини. Ці процеси відбуваються на різних : взаємодія фотонів або частинок іонізуючих випромінювань з атомами й молекулами, формування активних форм молекул, ушкодження біологічно важливих макромолекул, тощо.

З метою вивчення видоспецифічності дії іонізуючого випромінювання на організми різних рівнів організації виділяють радіаційну вірусологію, радіаційну мікробіологію, радіобіологію найпростіших, радіобіологію безхребетних, радіобіологію комах, радіобіологію рослин, радіобіологію тварин тощо.

Радіобіологія межує з науками, які досліджують дію електромагнітних хвиль, інфрачервоних, видимих і ультрафіолетових променів і радіохвиль.

Радіобіологія пов'язана з фізикою (радіаційна фізика), біофізикою (радіаційна біофізика), хімією і біохімією, межує з молекулярною радіобіологією, радіаційною цитологією, радіаційною екологією.

**Радіаційна фізика** розглядає процеси передачі енергії компонентам на біогеоценози різних рівнів, у тому числі на тваринні та рослинні угруповання й людину. Водночас вона досліджує реакції на опромінення будь-яких біологічних систем, а також особливості процесів, що спричиняють формування екологічної відповіді біогеоценозу на вплив радіації.

**Радіаційна біофізика** досліджує процеси взаємодії іонізуючого випромінювання з речовинами клітини: збудження електронів, іонізація молекул, внутрішньо-молекулярна міграція електронно-збудженого стану. Тобто радіаційна біофізика займається вивченням механізмів біологічної дії іонізуючих випромінювань.

**Радіаційна хімія** вивчає хімічні взаємодії між активними молекулярними формами, а також реакції цих форм з молекулами.

**Радіаційна біохімія** вивчає радіаційно-хімічні пошкодження біологічно важливих молекул.

**Радіаційна цитологія** вивчає патологію опроміненої клітини у всіх напрямках і тісно переплітається з радіаційною біохімією.

**Радіаційна біоценологія.** Внаслідок дії іонізуючої радіації на угруповання, або біоценози, можуть відбуватися зміни в їхньому видовому складі через зниження конкурентоспроможності домінантних видів або посилення життєвих позицій недомінантних, що й призводить до реконструктивної всього консорціуму. Зазначені явища досліджуються із заснуванням методів біоценології.

Залежно від об'єктів дослідження розрізняють радіаційну молекулярну біологію, радіаційну гістологію, радіаційну ембріологію, радіаційну генетику, радіобіологію тварин і рослин, медичну радіологію тощо.

**Радіаційна молекулярна біологія** досліджує вплив іонізуючого випромінювання на процеси, в яких беруть участь біологічні макромолекули, зокрема – ДНК, а саме на реплікацію ДНК, транскрипцію, трансляцію, біосинтез білкових молекул, біогенез клітинних структур, тощо.

**Радіаційна генетика** досліджує механізми виникнення генетичних, спадкових змін, мутацій унаслідок опромінення клітин, механізми їх збереження, припинення, поширення в геномі популяції, роль у формотворенні.

**Медична радіологія** розв'язує практичні завдання, пов'язані з мінімізацією наслідків опромінення людини, визначає принципи нормувань умовно безпечних доз опромінення, розробляє засоби безпечної рентгенодіагностики, оцінює дозові навантаження на людину за різних умов опромінення.

Отже, це комплексна, мультидисциплінарна галузь знань, що складається з окремих напрямів. У залежності від рівня дослідження живих систем здійснювалась і структуризація загальної радіобіології: молекулярна радіобіологія, циторадіобіологія, гісторадіобіологія, радіобіологія генетики, радіобіологія рослин і тварин тощо. Окремі напрями і розділи радіобіології тісно пов'язані між собою і об'єднуються узагальненою теорією – загальною радіобіологією.

## **1.2. Загальна радіобіологія та радіоекологія**

Загальна радіобіологія – наука порівняно молода, виникнення її пов'язано з відкриттям рентгенівського випромінювання (1895р) та природної радіоактивності (1896р). Разом з тим існують відомості, що згадані невідомі промені вперше були відкриті українським вченим Іваном Пулюєм з Тернопільщини ще задовго до В. Рентгена.

Дослідження в радіобіології спочатку зводились до постановки гіпотез і логічного їх обґрунтування. Внаслідок недостатнього розвитку на той час дозиметрії перші експерименти носили переважно описовий (якісний) характер.

Основними фундаментальними завданнями загальної радіобіології є:

- дослідження радіаційного ураження організмів за умови їх тотального опромінення;
- пізнання загальних закономірностей променевих реакцій клітин на дію іонізуючого опромінення;
- з'ясування причин різної радіочутливості організмів;
- керування радіобіологічними ефектами;
- пошуки різних способів захисту організмів від опромінення;
- пошуки способів і шляхів після радіаційного відновлення від ураження;
- прогнозування небезпеки для людства рівня радіації довкілля, що підвищується;
- пошуки нових шляхів використання іонізуючого випромінювання в медицині, сільському господарстві, харчовій і мікробіологічній промисловості тощо.

**Радіоекологія** досліджує розподіл, міграцію та кругообіг радіоактивних речовин в екосистемах та біосфері в цілому, а також вплив іонізуючого випромінювання, зумовленого наявністю радіоактивних речовин у довкіллі, на біогеоценози.

Радіоекологію розглядають і як розділ радіобіології, і як цілком самостійну науку, що сформувалася на стику екології і радіобіології.

Коло об'єктів, у межах яких досліджується вплив іонізуючого випромінювання на природне середовище охоплює всі складові екосистеми: літогенну основу, ґрунтовий покрив, водне та повітряне середовища, рослинний та тваринний світ, а, зрештою, й людину. Об'єктом радіоекологічного дослідження також вважається сукупність природних (геологічних, геоморфологічних, фізико-географічних та ін.) процесів, що відбуваються в екосистемах.

### **1.3. Коротка історія розвитку радіобіології**

Зародження радіобіології як науки пов'язано з трьома великими відомими відкриттями кінця XIX століття:

- 25 березня 1895 року німецький фізик, професор Вищої сільськогосподарської школи в Хоенгеймі, а пізніше ректор Мюнхенського університету Вільгельм Конрад Рентген, відкрив невідомі промені (X-промені як їх тоді називали). В. Рентген був першим фізиком, який 10 грудня 1901 року отримав за дане відкриття Нобелівську премію;
- 26 лютого 1896 року професор фізики Паризького музею історії А. Беккерель, фахівець в галузі люмінесценції, відкрив природну радіоактивність солей урану.
- 1898 року М. Склодовською-Кюрі, П. Кюрі, Е. Резерфордом, Н. Бором, Ф. Содді зроблено відкриття радіоактивних властивостей полонія і радія.

За ці відкриття ці вчені одержали Нобелівську премію.

**Перший етап** (1896 – 1945рр.) розпочався відразу ж після відкриття рентгенівських променів, який започаткував дослідження дії іонізуючого випромінювання, в тому числі і на біологічні об'єкти. Вважають, що народження радіобіології відбулось в 1899 році, коли була опублікована перша наукова праця Ф. Шаудину - відомого німецького вченого, який

дослідив реакцію декількох видів простіших організмів на дію іонізуючого випромінювання.

Нові промені були не тільки невидимі, а також невідчутні. Але міф про їх нешкідливість швидко розвіявся. Виянилось, що результатами впливу іонізуючого випромінювання можуть бути опіки шкіри, променеві виразки, випадіння волосся. Було встановлено, що іонізуюче випромінювання може справляти вплив на статеві залози. Пізніше було встановлено, що згадані невідомі промені можуть вбивати мишей. Тоді ж було помічено що різні клітини тканин і органи організму мають неоднакову чутливість до дії іонізуючого випромінювання, а всередині клітини найбільш чутливим є ядро. Загальною реакцією клітини на опромінення виявилось припинення клітинного ділення. Факти, що накопились на той час, стали фундаментом для поступового формування певних закономірностей, перша із яких і була сформульована в 1906 році. Це фундаментальний закон (правило) радіобіології І. Бергоньє - Л. Трибондо (французькі біологи) - чим активніше проліферують (розростання тканин організму тільки шляхом новоутворення і розмноження клітин) клітини, тим вони є радіочутливіші. Тобто чим більша здатність клітин до розмноження (ділення) і слабше виражена їх морфологія і функції (або диференціація) тим вони є більш радіочутливішими. Власне було пояснено різну чутливість різних клітин в організмі, а отже стало можливим подавляти пухлинні клітини з допомогою випромінювання.

Було відкрито мутагенну дію іонізуючого випромінювання - виникнення спадкових змін - мутацій. Це відкриття було зроблене в 1925 - 1927 рр. радянськими вченими Г.А. Надсенем і Г.С. Філіповим в експериментах на дріжджах, а пізніше Г. Меллером (США) на мушці дрозофілі. Зокрема було виявлено, що іонізуюче випромінювання не тільки пошкоджує спадковий механізм клітини, а також викликає в ньому необоротні зміни - мутації. Саме мутагенна дія та пригнічення проліферації лягли в основу поділу радіобіології на дві галузі практичного її застосування - це променева терапія та радіаційна селекція.

Через недостатній розвиток дозиметрії на той час (розділ фізики, що вивчає вимірювання іонізуючого випромінювання) даний період розвитку радіобіології характеризується переважно роботами описового характеру. Поступовий розвиток дозиметрії сприяв становленню кількісних принципів радіобіології, метою яких було пов'язати біологічний ефект з дозою випромінювання. В цей час було висунуто ряд теорій "мішені", "точкового тепла", "унікальних" та "масових" структур клітини та інші. По суті вся історія радіобіології являє собою ряд послідовних спроб науково пояснити існування радіобіологічного парадоксу. Така перша спроба і була зроблена фізиком Ф. Дессауером в 1922 - 1923 рр., який запропонував теорію "точкового тепла". Дана теорія пояснювала пошкодження клітини при іонізації (і точковим перегрівом) в деякому чутливому об'ємі, що становить невелику частину клітини. Згадана теорія пізніше була розвинена радянськими вченими Н.В. Тимофєєвим-Ресовським, К. Циммером та іншими, що пізніше було сформульовано, як "теорію мішені". Єдиної ж теорії радіобіологічних ефектів на сьогодні ще не існує.

Розвиток радіобіології пов'язано з відкриттям пострадіаційного відновлення і відкриття молекулярних механізмів такого відновлення - репарації ДНК (від лат. "reparatio" - відновлення). Репарація - це процес повного або часткового відновлення природної структури ДНК, пошкодженої при  $\gamma$ - опроміненні або хімічними агентами, який властивий клітинам всіх організмів. Було встановлено, що формування кінцевого радіобіологічного ефекту - це є поєднання процесів, що ведуть до пошкоджень і одночасних відновлювальних актів, що протидіють негативним змінам в організмі.

*Другий етап* (1945 – 1986) розвитку радіоекології припадає на роки масових випробувань ядерної і термоядерної зброї на Землі та становлення ядерної енергетики. Цей період характеризується значним забрудненням біосфери Землі радіонуклідами, що утворилися при застосуванні, випробуванні ядерної зброї, а також внаслідок аварій на підприємствах повного ядерного циклу (ПЯПЦ). Наприклад, аварії на Уралі м. Киштим 29 вересня 1957р і на заводі Уіндскейлі, США, 1957р.

Важливим етапом в розвитку радіобіології стала Женевська конференція 1955 року, щодо мирного використання атомної енергії, де постала проблема збільшення радіаційного фону внаслідок випробування ядерної зброї.

Нові складні завдання постали перед радіобіологами після вибухів атомних бомб над японськими містами Хіросіма та Нагасакі 6 і 9 серпня 1945 року.

Перед радіобіологією постали нові завдання, а саме:

- вивчення закономірностей протікання гострої променевої хвороби та наслідків короткотривалої дії великих доз іонізуючого випромінювання;
- виявлення механізмів променевої загибелі організму;
- виявлення природи відмінностей в радіочутливості органів та тканин;
- розгляд і визначення причин близьких та віддалених наслідків променевого пошкодження;
- дослідження генетичних аспектів променевого пошкодження стосовно соматичних (злаякісне переродження) і статевих (зміни в потомстві) клітин;
- пошук ефективних засобів від гострих променевих пошкоджень та їх лікування.

Були розвернуті програми наукових досліджень в різних країнах, об'єктами досліджень стали десятки тисяч людей, що постраждали від атомних бомбардувань Хіросіми та Нагасакі. Такі дослідження продовжуються і тепер. В експериментах на лабораторних тваринах стали вивчатись ефекти різної потужності та різної дози випромінювання, були випробувані десятки тисяч різних препаратів, як засобів від гострих променевих пошкоджень та їх лікування.

В цей період проводили дослідження такі відомі вчені, як А.П. Виноградов, В.І.Баранов, В.М.Клечковський, М.В.Тимофеев-Ресовський і розпочали дослідження такі відомі нині вчені, як Ю.А.Ізраель, І.А.Корнеєв, Е.Б.Тюрюканов, Б.С.Прістер, Н.А.Архіпов, Є.В.Юдінцев, Р.М.Алексахін, Н.В.Гулякін, Г.Г.Полікарпов та інші. Вагомий вклад в розвиток радіоекології зробили зарубіжні вчені Р.С.Рассел, Л.Фредеріксон, Ф.Людвіг, Р.Г.Мензель, Х.Німітц.

*Третій етап* у розвитку радіобіології розпочався після катастрофи на Чорнобильській АЕС (26 квітня 1986р).

Після катастрофи стало ясно, що ядерні вибухи - це не єдина і не сама серйозна небезпека для людства. Для вирішення проблем, що виникли в результаті аварії на Чорнобильській АЕС, накопичений радіобіологією досвід значною мірою виявився непридатним, адже, як виявилось, загрозою для здоров'я та життя людей може бути не лише короткотривале опромінення в малих дозах, а також і тривале опромінення при відносно малій потужності дози. Стало відомо, що при низьких дозах опромінення механізм пошкоджень, а також докази його променевої природи ускладнені, а роль взаємодії променивих та непроменивих факторів різко зростає. Тому терміново виникла потреба в нових широкомасштабних дослідженнях особливостей дії малих доз випромінювання, зокрема таких:

- особливості механізмів біологічної дії малих доз іонізуючого випромінювання;
- механізми пошкоджуючої та стимулюючої дії на різні живі системи;
- особливості комбінованого променевого пошкодження від сукупної дії радіонуклідів, що надходять всередину організму;
- взаємодія малих доз з іншими факторами середовища (забруднення атмосфери, води та ґрунту забруднювачами різної природи);
- пошук принципово нових протипроменивих засобів, придатних для тривалого введення в організм та інше.

Найбільш важливими характеристиками іонізуючого випромінювання є потужність експозиційної і поглиненої доз і час опромінення, які дозволяють встановити кількісну залежність між дією радіації і радіаційними ефектами. Саме кількість енергії, що передається іонізуючим випромінюванням клітинам живих організмів, обумовлює первинні радіаційні пошкодження в них: іонізацію, радіоліз води, зміщення атомів, розрив ланцюжків біополімерних сполук та генетичні пошкодження. Здатність імунної системи організму відновлювати нормальне функціонування клітин і нівелювати наслідки зазначених первинних пошкоджень обумовлює відсутність або появу незворотних ушкоджень. Знання цих кількісних залежностей "доза – ефект" необхідно для розробки норм радіаційної безпеки і санітарних правил захисту від впливу радіації, а також дозволяє прогнозувати ступінь тяжкості радіаційного ураження і визначати ефективну методику лікування.

*Результати наукових досліджень* є основою для розробки норм допустимих рівнів радіоактивності продуктів харчування, будівельних матеріалів, інших норм радіаційної безпеки і санітарних правил захисту від дії іонізуючого випромінювання. Санітарні правила захисту від дії радіації використовують результати досліджень властивостей різних видів іонізуючого випромінювання і характеристик їх взаємодії з речовиною. Ці правила, а також заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки персоналу і населення використовують три можливості, встановлені ядерною фізикою: захист часом (скоротити час експозиції), відстанню (за допомогою маніпуляторів, інших дистанційних і автоматизованих технологій) і екраном (свинець, бетон, вода, полімери, свинцеве скло тощо). Розробка і дотримання зазначених норм і

правил є важливим завданням комунальної і промислової радіаційної гігієни, практичної діяльності Міністерства охорони здоров'я населення.

Результати радіобіологічних досліджень разом з радіаційними нормами і санітарними правилами використовуються при проектуванні і експлуатації АЕС, інших радіаційних і ядерних технологій, для визначення радіаційних ризиків, обґрунтуванні методів і засобів радіаційної безпеки персоналу і населення і здійснення необхідних природоохоронних заходів.

#### ***1.4. Основні методи дослідження в радіобіології***

Основні методи дослідження в радіобіології пов'язані з кількісним співставленням дози, часу і площі опромінення.

У радіобіології широко застосовується метод безперервного моніторингу за навколишнім середовищем, біосферою, світом рослин і тварин, ґрунтом і водоймами тощо. Широко застосовуються фізичні, хімічні, біологічні та комплексні методи дослідження. Окрім того, постійно використовуються такі методи, як ізотопних індикаторів, груп (контрольної-дослідної), радіометрії (абсолютний, розрахунковий, відносний, експрес-метод), авторадіографії, експрес-аналіз, телеметрії, комп'ютерної обробки, біометрії, індукованого мутагенезу. Досить часто застосовують логічно-віртуально-символічний та метод моделювання, тобто створюються логічні імітаційні схеми та моделі, які є дуже близькі до реальних. За певних умов і поставленої задачі дослідження застосовують цитологічні, гістологічні, фізіологічні і морфологічні та інші методи.

Для визначення механізмів радіаційно-хімічних реакцій застосовують методи досліджень, які дозволяють виявлення первинних хімічних форм, що виникають внаслідок поглинання енергії іонізуючих випромінювань, а також дають змогу вивчати природу вільно радикальних станів молекул, реєструвати проміжні продукти радіаційно-хімічних перетворень із дуже коротким періодом існування, кількісно оцінювати кінетику швидкоплинних реакцій. Найчастіше використовують методи спектроскопії, імпульсного фотолізу (радіолізу) тощо.

У радіобіології і інших галузях науки широко застосовується метод ізотопних індикаторів (мічених атомів). Ізотопні індикатори – це ізотопи, які за масою відрізняються від атомів елемента, можуть бути використані в якості індикатора при вивченні різноманітних процесів його розподілу, переміщення і перетворення у складі різних речовин у різноманітних складних системах, у тому числі живих організмах. Серед ізотопних індикаторів розрізняють стабільні і радіоактивні природні та штучні ізотопи. Чутливість методу ізотопних індикаторів дуже висока і значно перевищує чутливість інших фізичних і хімічних методів.

У біологічних, фізіологічних, агротехнічних дослідженнях рослин і тварин частіше використовують стабільні ізотопи  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$  та радіоактивні –  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ . Методом ізотопних індикаторів вивчають переміщення, трофічні ланцюги і розподіл в організмі, роль у метаболічних процесах тих чи інших речовин й елементів. Метод ізотопних індикаторів базується на двох основних положеннях:

а) хімічні властивості різних ізотопів одного елемента практично однакові, тому їх поведінка в процесах, що вивчаються, не відрізняється від поведінки інших атомів того ж елемента;

б) радіоактивні ізотопи повинні використовуватись у таких дозах, котрі не повинні здійснювати біологічної дії на організми.

Використання в дослідженнях радіоактивних ізотопів вимагає дотримання техніки безпеки, постійно здійснювати контроль рівня радіаційного забруднення в лабораторіях, де проводяться такі дослідження.

Авторадіографія – це метод вивчення розподілу радіоактивних речовин у об'єкті, що досліджують. Більш темні плями на фотоматеріалі (плівці, папері, склі) свідчать про вищий рівень іонізації, менш темні – менший рівень іонізації, а світлі – вказують на відсутність іонізації. Це одержало назву авторадіограми (радіоавтографу), тобто, фотографічного зображення розподілу радіоактивних речовин у об'єкті, що досліджується. А слід, полосу, що залишає іонізація на фотоматеріалі називають “трек”. Розрізняють макроавторадіографію та мікроавторадіографію. Мікроавторадіографія вимагає готувати фіксовані препарати окремих органів.

У біології, медицині і ветеринарній медицині використовуються методи *in vitro* застосування радіоізотопів, коли вони не вводяться в організм. Зокрема, метод *in vitro* застосовують в ендокринології, і імунології, мікробіології, фармакології. Так радіо імунологічний аналіз дозволяє швидко і надійно визначати в біологічних рідинах і екстрактах з тканин вміст гормонів, ферментів, рецепторних білків, а також лікарські препарати.

Методи дослідження, що застосовуються в радіобіології дозволяють одержувати вірогідні дані про радіобіологічні ефекти, фізичну, хімічну і біологічну дію радіації на живі системи.

### ***Контрольні питання***

1. Дайте визначення радіобіології як науки.
2. Вкажіть предмет та об'єкт дослідження радіобіології.
3. Охарактеризуйте зв'язок радіобіології з іншими науками.
4. Назвіть та охарактеризуйте етапи розвитку радіобіології.
5. Назвіть зарубіжних і вітчизняних вчених, які зробили визначний внесок у розвиток радіобіології..
6. Назвіть основні методи дослідження в радіобіології.



## ТЕМА 2. ІОНІЗУЮЧА РАДІАЦІЯ. ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЯВИЩЕ РАДІОАКТИВНОСТІ ТА ЙОГО ФІЗИЧНА СУТЬ.

- 2.1. Явище радіоактивності. Закон радіоактивного розпаду
- 2.2. Визначення поняття іонізуючих випромінювань
- 2.3. Типи іонізуючих випромінювань
- 2.4. Природні джерела іонізуючих випромінювань
- 2.5. Антропогенні джерела іонізуючих випромінювань

### 2.1. Явище радіоактивності. Закон радіоактивного розпаду

Іонізуюче випромінювання об'єднує різноманітні види випромінювання за своєю природою, але всі вони подібні тим, що несуть високу енергію, іонізуючу дію та вражають біологічні об'єкти.

**Радіоактивність** – це спонтанне (не вимушене, не спричинене зовнішніми факторами) перетворення нестійкого ізотопу одного хімічного елемента із основного або збудженого (метастабільного) стану в ізотоп іншого елемента, що супроводжується виділенням енергії шляхом випускання елементарних частинок або ядер. Такі перетворення ядер та ядра, а також відповідні атоми називаються радіоактивними.

Характерним прикладом радіоактивного перетворення є ланцюгова реакція перетворення урану 238 у стабільний нуклід свинцю 206:

*Уран 238 – Торій 234 – Протактиній 234 – Уран 234 – Свинець 206.*

Час від часу від атома  $^{238}\text{U}$  відривається компактна група з чотирьох частинок: двох протонів і двох нейтронів. Таку групу називають  $\alpha$ -частинкою, а процес відокремлення альфа-розпадом або альфа-випромінюванням.

При цьому  $^{238}\text{U}$  перетворюється у торій-234 ( $^{234}\text{Th}$ ), проте й він нестабільний. Трансформація  $^{234}\text{Th}$  відбувається дещо інакше: один з нейтронів ядра змінюється на протон. Водночас один електрон втрачає пару і вилітає з атома. Такий процес називають бета-розпадом або бета-випромінюванням. Розрізняють електронний і позитронний бета-розпади. Під час таких розпадів виникає ядро нового хімічного елемента, який займає відповідно попереднє або наступне місце у таблиці Менделєєва. У нашому випадку – це протактиній-234 ( $^{234}\text{Pa}$ ).

Кожний альфа- або бета-розпад супроводжується звільненням енергії, яка передається далі у вигляді короткохвильового електромагнітного випромінювання. Нестабільний радіонуклід стає настільки збудженим, що викидає порцію чистої енергії і при цьому не втрачаються будь-які його частинки. Спостерігається лише виділення  $\gamma$ -фотона у процесі гамма-випромінювання. Далі з  $^{238}\text{U}$  відбуваються інші перетворення, що супроводжуються альфа-, бета- і гамма-випромінюванням. Весь цей довгий ланцюг радіоактивних перетворень закінчується стабільним нуклідом свинцю.

Радіоактивність значною мірою обумовлюється фізичними, хімічними особливостями будови і властивостями атома. Тому доцільно звернути особливу увагу на будову і властивості атома.

Термін “**атом**” означає “неподільний”. Атом – елементарна, доцільна досконало збудована частинка елемента, що зберігає його хімічні властивості.

У сучасному уявленні атом складається з ядра, що має позитивний електричний заряд, і хмари негативно заряджених електронів, що обертаються навколо ядра. Кількість електронів в атомі рівна сумарному позитивному заряду ядра, тому атоми нейтральні. Електрони рухаються по орбітах, що характеризуються основними, орбітальними і магнітними квантовими числами. Заряд ядра характеризує атомний номер і визначає його місце в таблиці хімічних елементів Менделєєва. Сучасні уявлення про будову атома базуються на квантовій механіці.

Ядро будь якого атома складається з елементарних частинок – протонів і нейтронів. Протони мають позитивний заряд, чисельно рівний і протилежний за знаком заряду електрона, і масу спокою. Нейтрони не мають електричного заряду, але мають теж масу спокою. Протони і нейтрони мають спільну назву – **нукліди**.

Нукліди, ядра яких мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називаються **ізотопами**. Ізотопи хімічно тотожні, але відрізняються масою і ядерними властивостями. Всі хімічні речовини мають ізотопи. Найменшу кількість відомих ізотопів (три – водень, дейтерій, тритій) має водень, а найбільшу (36) ксенон і цезій. Всього відомо близько 1300 ізотопів, з них 250 стабільні, інші радіоактивні. Ізотопи вуглецю і тритій утворюються під впливом космічної радіації.

**Радіоактивний ізотоп** – це атоми одного елемента, котрі мають різну масу, тобто різну кількість нейтронів при однаковій кількості протонів, наприклад, радіоактивний ізотоп йоду ( $J131$ ), радіоактивний ізотоп кобальту ( $Co60$ ). Терміни «ізотоп», «радіоактивний ізотоп» використовуються тоді, коли говориться про атоми одного і того самого елемента.

**Радіонуклід** – це нестійкий нуклід, такий, що розпадається. Термін “радіонуклід” застосовується для визначення атомів радіоактивних речовин, оскільки радіоактивні ізотопи, як правило, бувають у складі сполук і дуже рідко у вільному стані, наприклад радіонукліди  $^{89}Sr$ ,  $^{90}Sr$ ,  $^{134}Cs$ ,  $^{137}Cs$  тощо.

Будова атому всіх елементів обумовлена проявом фундаментальних гравітаційних, електромагнітних та ядерних сильних і слабких взаємозв'язків, завдяки яким атоми з'єднуються один з одним і уворюють молекули. Без чіткого і точного прояву цих взаємозв'язків стали б не можливі хімічні реакції, атомні і ядерні перетворення, а також було б не можливим органічне життя у величезному різноманітті його форм прояву. Сильні взаємозв'язки забезпечують наявність стабільних елементів, слабкі взаємозв'язки роблять можливим радіоактивний розпад. Згідно з співвідношенням Ейнштейна, кожному значенню маси  $m$  відповідає енергія –  $E = mc^2$  ( $c$  – швидкість світла у вакуумі).

Чим далі електрони знаходяться від ядра, тим слабший зв'язок мають з ядром і тому легше вступають у різні хімічні реакції. Електрони, що містяться і тому легше вступають у різні хімічні реакції. Електрони, що містяться на зовнішній орбіті, визначають хімічні властивості атома, тобто його властивості вступати у сполуки з іншими атомами. Атом за певних умов перебуває в стані основному (стабільному, спокою), збудження, іонізації, реіонізації, рекомбінації.

Процес передавання енергії електромагнітного випромінювання здійснюється за трьома такими механізмами:

- фотоелектричного ефекту,
- непружного півударяння (ефект Комптона)
- народження електронно-позитронних пар.

При наданні електронам зовні додаткової енергії, меншої, ніж енергія зв'язку електрона з ядром, вони будуть переходити з одного енергетичного рівня на інший. Такий атом залишається електрично нейтральним, але уже з надлишком енергії.

Атоми, що мають надлишок енергії, називаються **збудженими**, а перехід електронів з одного енергетичного рівня на інший - **процесом збудження**.

Оскільки ядро завжди прагне набути основного стану, за якого її енергія буде мінімальною, то атом зі збудженого стану переходить у початковий стан спокою. При цьому надлишкова енергія вивільнюється у вигляді порцій енергії – квантів. Наприклад, перехід електронів зі зовнішніх оболонок на внутрішні супроводжується рентгенівським випромінюванням з довжиною хвилі, характерною для кожного атома (характеристичне рентгенівське випромінювання).

### ***Закон радіоактивного розпаду***

Суть радіоактивного перетворення ядер полягає у наступному: маса ядра атома є меншою маси окремих нуклідів, з яких складається ядро на величину енергії зв'язку між нуклонами в ядрі (що виходить з принципу еквівалентності А.Ейнштейна, що встановлює рівність між енергією та масою  $E=mc^2$ ). Тому різні ядра мають різну енергію зв'язку, так як ядра з однаковою кількістю нуклонів, але різною кількістю протонів і електронів будуть мати різну енергію, про що згадувалось раніше.

Основний закон радіоактивного розпаду виражається формулою:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \text{ де}$$

$N_0$  – кількість ядер в об'ємі речовини на початку моменту часу,

$N$  – кількість ядер на момент часу  $t$ ,

$\lambda$  - постійна розпаду, що має зміст вірогідності розпаду ядра за 1 секунду.

Радіоактивний розпад характеризується середнім часом життя радіоактивного ізотопу  $\tau = 1/\lambda$  і періодом напіврозпаду, що виражається формулою  $T_{1/2} = \tau \ln 2$ .

Тому радіоактивні перетворення ядер – це здатність їх переходити з одного стану в інший з меншою енергією і випускати при цьому заряджені частинки або  $\gamma$ -кванти.

### ***Одиниці радіоактивності***

За міжнародною системою одиниць одиницею радіоактивності є беккерель (Бк) – це одиниця активності нукліда, рівна одному радіоактивному розпаду за секунду. Досить часто використовують позасистемну одиницю кюрі (Ки), яка відповідає активності 1 г радону-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Характерним показником радіаційної небезпеки контрольованої речовини чи матеріалу є питома радіоактивність. Цей параметр використовують як головний критерій забрудненості продуктів харчування, питної води, ґрунту,

будівельних матеріалів, сировини і продукції промислових підприємств. Виділяють *масову та об'ємну питому радіоактивність*, які відповідно вимірюють в Бк/кг (Кі/кг) та Бк/м<sup>3</sup> (Кі/м<sup>3</sup>)

## **2.2. Визначення поняття іонізуючих випромінювань**

Одним із фізичних чинників навколишнього середовища, який здатний негативно впливати на здоров'я людини, є іонізуюче випромінювання природного або техногенного походження.

*Іонізуючим випромінюванням* називають будь-яке випромінювання, взаємодія якого із середовищем, що опромінюється, викликає розпад нейтральних атомів і молекул на частинки іонів, які несуть на собі електричний заряд.

*До іонізуючого* випромінювання відносять радіоактивне випромінювання різних типів, які за час проходження крізь матерію, здатні іонізувати або збуджувати атоми і молекули її хімічних елементів. (Гродзинський, 2000).

Термін “радіація” введений у науку П'єром Кюрі і Марією Складовською-Кюрі (1898) і застосовується не тільки до іонізуючого випромінювання, але і цілого ряду інших фізичних явищ, наприклад, сонячна радіація, теплова радіація тощо.

*Радіація* (radiation) – це іонізуюче випромінювання (електронів, позитронів, мезонів, нейтронів, ядер елементів, електромагнітних коливань), взаємодія якого з середовищем приводить до утворення іонів різних знаків.

Радіація є скрізь. Вона надходить з космосу, з природних земних речовин, утворюється при горінні та вугільно-топливному циклі. Наземні джерела радіації забезпечують приблизно 5/6 дози природного опромінення населення, а космічні – менше 1/6 дози.

## **2.3. Типи іонізуючих випромінювань**

Розрізняють два типи іонізуючого випромінювання – електромагнітне (некорпускулярне) і корпускулярне

*Електромагнітне випромінювання* являє собою сукупність змінних станів електричного й магнітного полів, які поширюються довкіллям у вигляді хвиль. До електромагнітного випромінювання відносять ультрафіолетові промені з довжиною хвилі ( $\lambda$ ) від 400 до 50 нм, рентгенівські промені ( $\lambda$  від 50 до 0,01 нм) та гамма-випромінювання ( $\lambda$  менш як 0,01 нм). Оптичні і радіохвилі теж відносяться до електромагнітних випромінювань, але не здійснюють іонізації, оскільки мають низьку енергію.

Ультрафіолетові промені мають природне походження і надходять на земну поверхню від Сонця із космічного простору. Вони шкідливі для живих складових екосистеми. Останнім часом потужність ультрафіолетового випромінювання значно збільшилася внаслідок зменшення щільності захисного озонового шару Землі і виникнення «озонових дір».

*Корпускулярне випромінювання* – це потік частинок, які мають ненульове значення маси спокою (Бак, Александер, 1963).

До цього типу випромінювання відносять потоки найменших частинок атома (електронів, протонів), ядер різних хімічних елементів (гелію, кисню та ін.), а також нейтронів – елементарних незаряджених частинок.

Потоки нейтронів одержують в ядерних реакторах і у спеціальних нейтронних генераторах на основі ланцюгових ядерних реакцій, які є важливою складовою випромінювання, що супроводжує будь-який атомний вибух.

Найважливішими в гігієнічному відношенні характеристиками будь-яких іонізуючих випромінювань є їх проникна здатність, енергія та щільність іонізації (інтенсивність іонізації середовища, яке опромінюється).

Для  **$\alpha$  – променів** (за енергії 4MeV) проникна здатність (довжина пробігу) становить: у повітрі – 2,5см, у біологічній тканині – 0,03 мм, в алюмінії – 0,016мм. Ці промені легко затримуються навіть тонким шаром паперу. Тому в разі зовнішнього опромінення  $\alpha$ –промені суттєвої біологічної загрози для людини не становлять. Однак ця загроза значно зростає у випадках так званої інкорпорації, тобто проникнення  $\alpha$ –частинок в організм з вдихуванням повітрям, перорально, перентально та іншими шляхами. У таких випадках дія  $\alpha$ –променів особливо згубна, оскільки притаманна їм щільність іонізації в декілька тисяч разів більша ніж у  $\beta$ –частинок і  $\gamma$ –променів. Під час проходження шляху в повітрі довжиною в 1см  $\alpha$ –частинки утворюють до 100000 пар іонів.

**$\beta$ -частинки** можуть мати негативний (електронний  $\beta$ -розпад) або позитивний ( $\beta$ -розпад) заряд. Їх проникна здатність значно вища, ніж в  $\alpha$ –частинок. Довжина пробігу  $\beta$ –частинок у повітрі може сягати декількох метрів, у воді – 2,6мм, алюмінії – 9,7мм. Однак щільність іонізації менша, ніж в  $\alpha$ –частинок у сотні тисяч разів – під час проходження 1см повітряного середовища вони створюють лише 50-150 пар іонів.

**$\gamma$ -промені** являють собою потік електромагнітних хвиль завдовжки від 0,1 до 0,01 нм і мають швидкість руху, що близька до швидкості світла. Проникна здатність і довжина їх пробігу значно вищі, ніж в  $\alpha$ – і  $\beta$ –частинок. Вони вільно проникають не тільки крізь тіло людини, а й крізь значно щільніші середовища. Однак щільність іонізації значно менша, ніж при  $\alpha$ – або  $\beta$ -опроміненні.

До корпускулярних випромінювань, які виникають унаслідок ядерних реакцій, відносять також нейтрони. Проникна здатність нейтронного випромінювання приблизно така сама, як і у  $\gamma$ –променів. Залежно від типу (швидкості руху) нейтронів вони поглинаються різними матеріалами, які містять бор, графіт, свинець, парафін, бетон та ін. До корпускулярних іонізуючих випромінювань відносяться і  $\pi$ -мезони – елементарні частинки з негативним зарядом, енергією 25-100 MeV та масою, що майже у 300 разів перевищує масу електронів.

Одним із поширених видів електромагнітного випромінювання, яке теж справляє іонізуючий ефект, є рентгенівське. Отримують штучно в результаті гальмування заряджених частинок в електричному полі, яке й генерує це електромагнітне випромінювання. Для генерації рентгенівського випромінювання застосовують поширені у медицині рентгенівські апарати. Рентгенівським променям притаманна висока проникність (чим менша довжина хвилі, яка залежить від напруги, що подається на трубку, тим більша проникна здатність).

### **2.3. Природні джерела іонізуючих випромінювань**

За нормальних умов існування суспільства головну частину іонізуючого випромінювання екосистеми Землі отримують від природних джерел радіації, а саме – від природних радіоактивних елементів. На сьогодні виявлено 340 видів ізотопів різних хімічних елементів, що складаються з радіоактивних протонів, електронів і нейтронів (Гродзинський, 2000). Більшість з природних джерел радіації такі, що уникнути опромінення від них практично неможливо. Упродовж усієї історії розвитку Землі різні види іонізуючого випромінювання потрапляли на її поверхню з космосу або надходили у результаті розпаду радіоактивних речовин, які містяться в глибинах земної кори.

Опромінення від природних джерел радіації більшою або меншою мірою зазнає будь-який живий організм на Землі, зокрема і людина. Доза опромінення залежить від географічного місцезположення екосистеми. Рівень радіації у певних місцях планети із заляганням радіоактивних гірських порід є значно вище середнього, тоді як в інших місцях він відповідно нижче. Доза опромінення людини залежить від її способу життя і раціону харчування.

Використання деяких будівельних матеріалів, застосування газу для приготування їжі, надмірна герметизація приміщення, а також перельоти на літаку збільшують рівень опромінення людини через природні джерела радіації.

**Радіаційний фон** – це фон, що створюється космічним випромінюванням, природними і штучними радіоактивними речовинами та джерелами іонізуючого випромінювання.

Космічна радіація вічна, вона в умовах Землі є скрізь. Хоча на Північному і Південному полюсах планети її більше, ніж в екваторіальній зоні. Це значною мірою обумовлено наявністю магнітного поля планети, силові лінії якого виходять і входять на полюсах.

У різних регіонах планети Земля радіаційний фон різний. Він збільшується у регіонах, де є родовища уранових руд, радіоактивних сланців тощо. В Україні до зон підвищеної радіоактивності належать Жовті води, Миронівка, Хмельник, Кіровоградська область тощо.

Чим вище над рівнем моря, тим інтенсивнішою є радіація, оскільки повітря значною мірою захищає Землю від космічної радіації. Наприклад, доза опромінення протягом року на рівні моря становить 0,3 мЗв, на висоті 4000 м над рівнем моря – 1,7 мЗв, а на висоті 12 км вона зростає у 25 разів. Тому опромінення при польотах залежить від висоти і тривалості польоту. Так, при польоті з Москви до Хабаровська екіпаж одержує опромінення 4—50 мЗв.

У земній корі виявлено 340 ізотопів хімічних елементів, що мають радіоактивні ядра. З них близько 70 належать до важких металів. Усі елементи з атомним номером вищим за 80 є радіоактивними.

Виділяють три групи радіонуклідів, що містяться в земній корі:

- радіоактивні елементи, поява яких зумовлена ядерними реакціями із зарядженими частинками космічних променів, - космогенні природні радіонукліди;
- радіонукліди, походження яких, не пов'язане з важкими радіоактивними елементами, - поодинокі природні радіонукліди;

- радіонукліди, що входять до радіоактивних сімейств.

### ***Космічне випромінювання***

Космічне випромінювання за своїм походженням поділяють на первинне і вторинне. Первинне складається з частинок легких елементів – водню, гелію, літію, берилію, бору та інших. Ці частинки енергії утворюються в надрах Галактики та Сонця.

Вторинне космічне випромінювання - це енергія, утворена в результаті взаємодії первинних космічних часток з атмосферою Землі. Воно складається з електронів, протонів, мезонів, фотонів тощо.

Космічні промені, досягаючи поверхні Землі та взаємодіючи з атмосферою, утворюють різноманітні *космогенні радіонукліди*. Космогенні радіонукліди виникають унаслідок ядерної реакції між ядрами хімічних елементів земного походження й частинками космічних променів.

У глибинних товщах земної кори космічні промені швидко поглинаються іншими хімічними елементами, тому найбільше цих природних радіонуклідів міститься в атмосфері, особливо у тропосфері, а також у верхніх земних шарах – ґрунтовому покриві та четвертинних відкладах. Шар атмосферного повітря служить природним захисним екраном від радіації та ультрофіолетових променів. Найбільші концентрації серед радіонуклідів космічного походження мають тритій ( $^3\text{H}$ ) та радіовуглець ( $^{14}\text{C}$ ) (Кузин, 1991).

***До поодиноких природних радіонуклідів*** належить досить багато радіоізоотопів різних хімічних елементів із такими масовими числами, що мають по кілька ізоотопів, і деякі з них є радіоактивними. Внаслідок біогеохімічних або геохімічних перетворень елементів з указаними значеннями масових чисел їхній ізоотопний склад практично не змінюється. Зрозуміло, періоди напіврозпаду поодиноких радіонуклідів дуже великі, бо інакше за час існування Землі вони мали б практично повністю розпастися.

З даних табл. 2.3.1. випливає, що найбільше значення, як джерело іонізуючого випромінювання, має калій. Ядра радіоактивних ізоотопів  $^{40}\text{K}$  розпадаються таким чином: 89% ядер, що зазнають радіоактивного перетворення за типом бета-розпаду, утворюють ізотопи  $^{40}\text{Ca}$ , а решта 11% — шляхом електронного захоплення перетворюються на  $^{40}\text{Ar}$ . За акт радіоактивного розкиду виділяється енергія 1,35 МеВ.

***Таблиця 2.3.1.***

### ***Характеристика поодиноких радіонуклідів земного походження***

Радіону-клід	Ізото-пне збага-чення, %	Період напіврозпаду, роки	Головні типи випромінювання /енергія МеВ/ вихід, %	Питома активність елемента, Бк/л
$^{40}\text{K}$	0,012	$1,26 \times 10^9$	$\beta^-/1,33/89$ $\gamma(\text{E3})^*/1,46/11$	31,6
$^{50}\text{V}$	0,250	$6,0 \times 10^{15}$	$\gamma(\beta^-)/0,78/30$ $\gamma(\text{E3})/1,55/70$	$1,1 \times 10^{-4}$
$^{87}\text{Rb}$	27,000	$4,8 \times 10^{10}$	$\beta^-/0,28/100$	$8,9 \times 10^2$
$^{115}\text{In}$	95,800	$6,0 \times 10^{14}$	$\beta^-/0,78/100$	0,18
$^{123}\text{Te}$	0,870	$1,2 \times 10^{14}$	E3/-/-	0,08

$^{138}\text{La}$	0,089	$1,12 \times 10^{11}$	$\beta^-/0,21/80$ $\gamma(\text{EЗ})/0,81; 1,43/70$	0,77
$^{142}\text{Ce}$	11,070	$>5,0 \times 10^{16}$	$\alpha/-/-$	$0,9 \times 10^{-2}$
$^{144}\text{Nd}$	23,900	$2,4 \times 10^{15}$	$\alpha/1,83/-$	$0,92 \times 10^{-2}$
$^{146}\text{Sm}$	13,820	$>1,0 \times 10^{15}$	-	129,5
$^{147}\text{Sm}$	15,100	$1,05 \times 10^{11}$	$\alpha/2,23/-$	$5,07 \times 10^{-2}$
$^{148}\text{Sm}$	11,270	$>2,0 \times 10^{14}$	-	$1,22 \times 10^{-2}$
$^{152}\text{Cd}$	0,200	$1,1 \times 10^{14}$	$\alpha/2,1/-$	$1,6 \times 10^{-3}$
$^{156}\text{Dy}$	0,052	$>1,0 \times 10^{14}$	-	$4,4 \times 10^{-8}$
$^{174}\text{Hf}$	0,163	$2,0 \times 10^{15}$	$\alpha/2,5/-$	$6,2 \times 10^{-5}$
$^{176}\text{Lu}$	2,600	$2,2 \times 10^{10}$	$\beta^-/0,43/-$	88,8
$^{180}\text{Ta}$	0,012	$>1,0 \times 10^{12}$	-	$0,9 \times 10^{-2}$
$^{226}\text{Re}$	62,900	$4,3 \times 10^{10}$	$\beta^-/0,003/-$	1036
$^{190}\text{Pt}$	0,013	$6,9 \times 10^{11}$	$\alpha/3,18/-$	$1,3 \times 10^{-2}$

\*ЕЗ – електронне захоплення

**Сімейства важких природних радіоактивних елементів.** Важкі природні радіоактивні елементи відрізняються від поодиноких радіонуклідів тим, що вони пов'язані між собою як продукти послідовних радіоактивних перетворень у трьох групах елементів, що дістали назву радіоактивних сімейств. Практичне значення в природі мають три радіоактивні сімейства: урану-радію, родоначальником якого є  $^{238}\text{U}$ , актиноурану ( $^{235}\text{U}$ ), торію, родоначальником якого є  $^{232}\text{Th}$ .

У біосфері радіонукліди важких елементів містяться в будь-яких природних матеріалах у розсіяному стані. В ґрунтах важкі природні радіоактивні ізотопи можуть міститися в кристалічних ґратках алюмосилікатних мінеральних частинок, у формі розчинних у воді основ, у вигляді іонів і молекул, адсорбованих органічними й глинистими колоїдами, а також у формі окисних та інших важкорозчинних сполук. Лише в деяких із цих форм радіонукліди доступні для живих організмів, зокрема рослин, а відтак, здатні до біогеохімічної міграції. Співвідношення між доступними й малодоступними формами радіонуклідів важких природних елементів істотно залежить від типу ґрунту, кислотності ґрунтового розчину, обмінної ємності та деяких інших властивостей ґрунтів.

Середні значення коефіцієнтів нагромадження важких радіоактивних елементів у рослинах здебільшого доволі низькі — порядку  $10^{-3}$ , проте іноді спостерігаються й істотні коливання їх у межах  $(0,01...60)10^{-3}$ .

Найвагомішим радіонуклідом щодо дозоутворення найчастіше буває дочірній продукт  $^{226}\text{Ra}$  –  $^{222}\text{Rn}$ . Середня концентрація цього радіонукліда в повітрі за межами приміщень варіює в межах  $(0,37...1,85)10^{-2}$  Бк/л. До благородних газів належить також і продукт розпаду  $^{224}\text{Ra}$  із сімейства  $^{232}\text{Th}$  — радон ( $^{220}\text{Rn}$ ). Радон і торон дифундують із ґрунту в атмосферу.

Навесні, внаслідок розморожування шару ґрунту, часом спостерігається вихід у атмосферу значних активностей радону, який нагромадився за зиму.

В приміщеннях будівель, споруджених із матеріалів, що мають підвищений вміст радію, концентрація радону може досягати небажано високих значень.



Таблиця 2.3.2.

## Середній рівень природного фону (за даними UNSCEAR, 1982 р.)

Джерела опромінення	Загальна щорічна доза, мкЗв
Зовнішнього:	
космічні промені	301
радіоактивні елементи та ізотопи	350
Внутрішнього:	
космогенні радіонукліди:	
$^7\text{Be}$	3
$^{14}\text{C}$	12
земні радіонукліди:	
$^{40}\text{K}$	180
$^{87}\text{Rb}$	6
$^{238}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$	10
$^{230}\text{Th}$	7
$^{232}\text{Th}$	3
$^{226}\text{Ra}$	7
$^{228}\text{Ra}$ та його дочірні ізотопи	183
$^{222}\text{Rn}$ , $^{214}\text{Po}$	800
$^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$	130
Разом	1992

Розпад радіонукліда  $^{222}\text{Rn}$  супроводжується появою низки короткотривалих ізотопів, які в ході радіоактивних перетворень випромінюють  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинки. Ці дочірні радіонукліди адсорбуються пиловими частинками, котрі в такий спосіб стають носіями радіоактивності й, потрапляючи під час дихання в організм, зумовлюють формування інгаляційної дози (рис. 2.1).

Уран, потрапивши з продуктами харчування в організм людини, відкладається в кістках. У кістку дорослої людини міститься близько 25 мкг урану, що еквівалентно 0,3 Бк. Відповідно до цієї концентрації урану на кісткову тканину припадає доза порядку 10 мкГр.

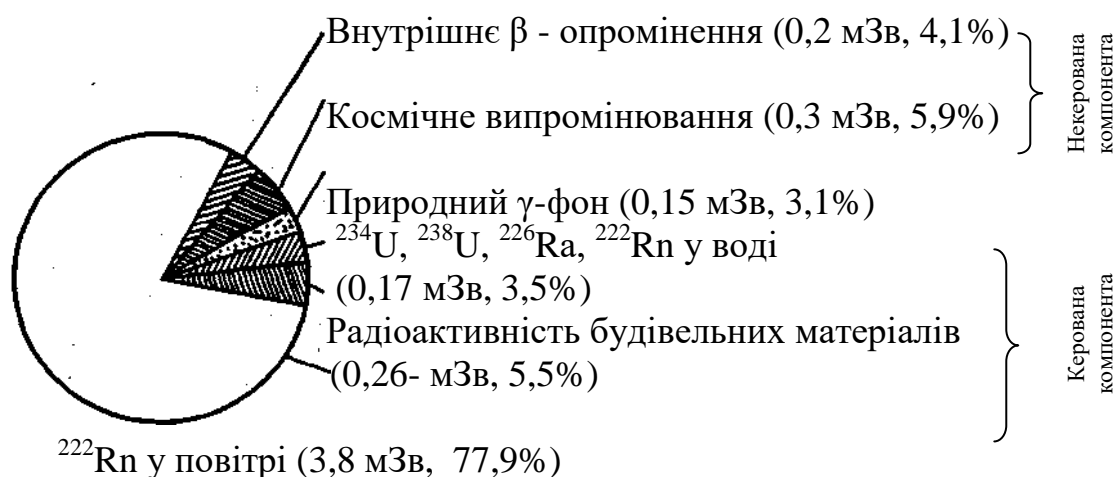


Рис 2.3.1. Структура річних ефективних доз опромінення людини від природної радіоактивності (сумарна річна доза становить 4,88 мЗв)

В організмі людини 80 % радію міститься в кістках. Середня активність радію в тілі становить 0,85 Бк, хоча буває й вищою (до 3,7 Бк у кістку).

#### 2.4. Антропогенні джерела іонізуючих випромінювань

Значний внесок у підвищення радіоакційного фону дають антропогенні джерела випромінювань:

- ядерні установки (реактори АЕС, склади атомної зброї, підприємства з переробки радіоактивних відходів, речовин);
- промислові прилади дозиметричного контролю, які широко використовуються у виробництві при неруйнівних методах контролю якості виробів;
- промислові процеси, що збільшують дозоутворювальну здатність природних радіонуклідів;
- використання іонізуючих випромінювань у медицині для діагностики й терапії;
- наукові дослідження із застосуванням методу мічених радіоактивних атомів.

На величину природного радіоактивного фону впливає і діяльність людини. Наприклад, при спалюванні вугілля в домашніх грубках, в теплових електростанціях у доквілля потрапляють відходи - зола, а вона містить радіоактивні елементи - торій, уран, радій, що колись були сконцентровані рослинами, з яких вугілля утворилося. Іноді фон біля таких станцій вищий, ніж біля атомних. Певне забруднення викликала аварія на Чорнобильській атомній станції.

Таблиця 2.4.1.

#### Антропогенні джерела іонізуючого випромінювання

Найменування джерел	Річна доза		Частка від природного фону, % (до 200 мбер)
	мбер	мЗв	
Медичні прилади (рентгенографія зуба Збер, рентгенографія легень 2-6 бер, флюорографія 370 мбер, рентгеноскопія)	100-150	1,0-1,5	50-75
Польоти в літаках (відстань 2000 км, висота – 12 км) – 5 разів протягом року	2,5-5,0	0,02-0,05	1,0-2,5
Телевізор (4 години протягом доби)	1,0	0,01	0,05
Комп'ютер	0,1	0,001	0,05
Теплові електростанції (на вугіллі), відстань 20 км	0,6-6,0	0,006-0,06	0,3-3,0
Випробування ядерної зброї	2,5	0,02	1,0

Вплив іонізуючих випромінювань на різні рівні організмів обумовлений їх здатністю проникати в середину опромінюваного об'єкту і ефективно взаємодіяти з його структурами, оскільки, енергія квантів і частинок значно переважає енергію внутрішньомолекулярних зв'язків. За своїми властивостями

корпускулярне випромінювання не несе значної небезпеки доти, поки радіоактивні ізотопи, що їх випромінюють, не проникають до організму з водою, повітрям, їжею. До організму вони потрапляють через системи органів травлення, дихання та через шкіру. Перетворившись в інкорпоровані джерела радіації вони стають надзвичайно небезпечними. Поведінка інкорпорованих радіонуклідів залежить від їх хімічної природи і властивостей.

### ***Контрольні питання***

1. Розкрийте суть явища радіоактивності.
2. Охарактеризуйте будову атома.
3. Поясніть процес збудження атома та іонізації.
4. Вкажіть сили, що забезпечують стійкість атома.
5. Якою формулою виражається основний закон радіоактивного розпаду?
6. Дайте характеристику типам іонізуючих випромінювань.
7. Дайте визначення поняттям «іонізуюче випромінювання», «радіація».
8. Які із випромінювань характеризуються найбільшою іонізаційною здатністю?
9. Вкажіть одиниці радіоактивності.
10. Вкажіть основні джерела іонізуючих випромінювань.
11. Назвіть радіоактивні сімейства та з'ясуйте послідовність радіоактивних перетворень.
12. Назвіть радіоізотопи, які належать до поодиноких природних радіонуклідів.

## ТЕМА 3. ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

3.1. *Поняття дози іонізуючого випромінювання. Види доз та одиниці їх виміру.*

3.2. *Способи передавання дози опромінюваним об'єктам.*

3.3. *Класифікація потужностей доз опромінення.*

3.4. *Методи дозиметрії.*

3.5. *Апаратура для дозиметричних і радіометричних досліджень.*

### **3.1. Поняття дози іонізуючого випромінювання. Види доз та одиниці їх виміру**

Всі види радіоактивного випромінювання супроводжуються звільненням різної кількості енергії і високою проникаючою здатністю, відтак вони мають різний вплив на живі організми і екосистеми взагалі.

Пошкодження, викликані в живих організмах опроміненням, є тим більшими, чим більше енергії передано їхнім тканинам. Кількість такої енергії називається *дозою*.

*Дозу іонізуючого випромінювання* людина може зазнати від будь-якого радіонукліда або їхньої суміші незалежно від того, містяться вони поза організмом або всередині нього.

Кількісний вираз енергії випромінювання, отриманої одиницею маси опроміненого тіла (складової екосистеми, тканини організму тощо), називають *поглинутою дозою*, яка в системі СІ вимірюється в греях (1 Гр = 1 Дж енергії, поглиненому масою в 1 кг).

*Поглинута доза* – це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинута тканинами організму, що опромінюється, в перерахунку на одиницю маси.

До 50-х років ХХ ст. для вимірювання обсягу радіації широко використовували інші позасистемні одиниці поглиненої дози – рентген (Р) і рад. Один рентген відповідає ефекту дії граму радію протягом години на відстані одного метра, що визначається за ступенем почервоніння шкіри. Один рад дорівнює 0,01 Гр.

Якщо кількість поглиненої енергії гамма- або рентгенівського випромінювання розглядати не для речовини, а для повітря, то слід ввести поняття його іонізації. Причому, для атмосфери існує спеціальна одиниця, яка співвідносить заряд іонів кожного знаку в 1 см<sup>3</sup> сухого повітря, що виникло у процесі його іонізації з дозою цього випромінювання. Загальний обсяг випромінювання, що викликає іонізацію називають *експозиційною дозою*, яка в системі СІ вимірюється в кулонах на кілограм (Кл/кг). Поряд існує позасистемна одиниця вимірювання – рентген (1Р = 2,58 × 10<sup>-4</sup> Кл/кг).

Велику роль в опроміненні всього живого в екосистемі відіграє не лише кількість іонізуючого випромінювання, поглиненого тілом, а й якість цього випромінювання. Якісна характеристика випромінювання визначається показником лінійної щільності іонізуючого потоку. Вважається, що щільність бета-, гамма- і рентгенівського випромінювання є однаковою, умовно вона приймається за одиницю. Тоді показник щільності повільних нейтронів дорівнює 5, звичайних нейтронів – 10, а для α-частинок та надшвидких

нейтронів – 20. Перераховану в такий спосіб дозу опромінення називають **еквівалентною дозою**. Її у системі СІ вимірюють у зівертах (Зв). Відома й позасистемна одиниця еквівалентної дози – бер (1 бер = 0,01 Зв).

**Еквівалентна доза** – це поглинута доза, помножена на коефіцієнт якості випромінювання, який враховує здатність певного виду випромінювань пошкоджувати тканини організму. Коефіцієнт якості випромінювання є найбільшим для  $\alpha$ -випромінювання і дорівнює 20. Коефіцієнт якості для  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінювання становить 1.

Водночас важливо врахувати й те, що не всі частини тіла людини (органи, тканини) чи інших організмів екосистем мають однакову чутливість. Наприклад, при однаковій еквівалентній дозі опромінення виникнення раку в легенях людини більш вірогідне, ніж у її щитовидній залозі. Саме тому дози опромінення для різних органів і тканин необхідно перераховувати за різними коефіцієнтами. Підсумувавши ці коефіцієнти по всіх тканинах людини, отримують **ефективну еквівалентну дозу**. Найменш чутливою до опромінення є шкіра і поверхня кісток людини, а найбільш – яєчники і сім'яники.

**Ефективна доза** – це еквівалентна доза, помножена на коефіцієнт, який враховує ступінь чутливості різних тканин до впливу іонізуючого випромінювання.

Усе це характеризує лише індивідуальні дози іонізуючого випромінювання. Підсумувавши індивідуальні ефективні еквівалентні дози, здобуті певною групою людей, ми виявляємо **колективну ефективну еквівалентну дозу**, вимірювану в людино-зівертах (люд-Зв).

Більшість відомих радіонуклідів розпадаються надзвичайно повільно, відтак вони залишаються радіоактивними й у далекому майбутньому. Колективну ефективну еквівалентну дозу, яка припадає на кілька поколінь від певного джерела іонізуючого випромінювання за весь час його існування, називають **повною (очікуваною) колективною ефективною еквівалентною дозою**.

З метою прогнозування інтенсивності радіоактивного впливу на довкілля і людину введено поняття **потужності дози**. Відповідні потужності поглиненої, експозиційної чи еквівалентної доз дорівнюють кількості енергії, що отримана будь-якою речовиною за одиницю часу від джерела радіації.

Наприклад, дозиметр показує потужність еквівалентної дози гранітних сходів – 0,8 мкЗв/год. За умов, якщо людина просидить на цих сходах 5 годин, вона отримає таку дозу радіаційного опромінення:

$0,8 \text{ мкЗв/год} \times 5 \text{ год} = 4 \text{ мкЗв}$  (400 мкбер), що в 25-50 разів вище дози отриманої нею від сонячної радіації за аналогічний період часу.

Розглянуті величини доз іонізуючого випромінювання використовують не лише для нормування дозових навантажень людини, але й для всієї екосистеми чи будь-якого її компонента.

Для дозиметричної характеристики ефекту дії іонізуючого випромінювання на довкілля (повітря) і біологічні об'єкти використовують різні одиниці випромінювання: рентген, грей, бер, зіверт та інші дані про які наведено в таблиці 3.1.1.

Таблиця 3.1.1.

## Основні дозиметричні одиниці та їх співвідношення

Дозиметрична одиниця	Одиниця виміру		Співвідношення одиниць
	СІ	позасистемна	
Активність, $A$	Беккерель, Бк	Кюрі, Кі	$1\text{Бк}=2,7\times 10^{11}\text{Кі}$ $1\text{Кі}=3,7\times 10^{10}\text{Бк}$
Питома активність, $A_m$	Беккерель на кілограм, Бк/кг	Кюрі на грам, Кі/г	$1\text{Кі/г}=3,7\times 10^{11}\text{Бк/кг}$ $1\text{Бк/кг}=2,7\times 10^{-14}\text{Кі/г}$
Експозиційна доза випромінювання	Кулон на кілограм, Кл/кг	Рентген, Р	$1\text{Кл/кг}=3876\text{Р}$ $1\text{Р}=2,58\times 10^{-4}\text{Кл/кг}$
Потужність експозиційної дози	Ампер на кілограм, А/кг	Рентген за секунду, Р/с	$1\text{А/кг}=3879\text{Р/с}$ $1\text{Р/с}=2,58\times 10^{-4}\text{Кл/кг}$
Поглинена доза, $D$	Грей, Гр	Рад	$1\text{Гр}=100\text{рад}$ $1\text{рад}=0,01\text{Гр}$
Потужність поглиненої дози, $D$	Грей за секунду, Гр/с	Рад за секунду, рад/с	$1\text{Гр/с}=100\text{рад/с}$ $1\text{рад/с}=0,01\text{Гр/с}$
Еквівалентна доза, $H$	Зіверт, Зв	Біологічний еквівалент раду, бер	$1\text{Зв}=100\text{бер}$ $1\text{бер}=0,01\text{Зв}$
Потужність еквівалентної дози, $H$	Зіверт за секунду, Зв/с	Бер за секунду, бер/с	$1\text{Зв/с}=100\text{бер/с}$ $1\text{бер/с}=0,01\text{Зв/с}$
Ефективна доза, $E$	Зіверт, Зв	Біологічний еквівалент раду, бер	$1\text{бер}=0,01\text{Зв}$ $1\text{Зв}=100\text{бер}$
Щільність забруднення, $b$	Кюрі на 1 квадратний кілометр, Кі/км <sup>2</sup>		$1\text{Кі/км}^2=3,7\times 10^4\text{Бк/м}^2$

## 3.2. Способи передавання дози опромінюваним об'єктам

Способи передавання дози опромінюваним об'єктам, тобто часові характеристики опромінення, здебільшого визначають особливості процесів, що розвиваються внаслідок опромінення.

За часом передавання дози об'єкту розрізняють кілька способів опромінення:

гостре, гостре фракціоноване, нееквівалентне фракціоноване, хронічне з постійною потужністю дози, пролонговане з постійною потужністю дози, пролонговане з змінною потужністю дози, переривчасте.

Якщо дозу дають за порівняно короткий проміжок часу (протя якого не встигає змінитися фізіологічний стан організму, клітини), опромінення називають *гострим*. Очевидно, гострому опроміненню в дозі  $D$  відповідає й інтервал потужностей доз, нижня межа якого  $P_{min} = D/t_{max}$ , де  $t_{max}$  - найбільша тривалість процесу опромінювання, за якої опромінення ще можна вважати гострим.

Якщо нагромадження дози досягається внаслідок кількох гострих опромінення відповідною частинкою дози, опромінення називають *гострим фракціонованим*.

Якщо дозу подібно на однакові порції, то йдеться про **еквівалентне фракціоноване опромінення**, якщо на різні, - про **нееквівалентне**. Проміжки часу між окреми опромінюваннями також можуть бути однаковими або різними. Найчастіше використовують еквівалентне фракціоноване опромінення двома однаковими порціями дози (по 0,5 Д). Гостре фракціоноване опромінення застосовують у рентгено- й радіотерапії при злоякісних пухлинах.

**Пролонгованим опроміненням** називають такий спосіб радіаційного впливу, коли об'єкт отримує дозу за час, що значно перевищує тривалість гострого опромінення. При цьому під час опромінювання стан об'єкта може істотно змінюватися. Пролонговане опромінені буває **безперервним і фракціонованим**. У разі фракціонованого прологованого опромінення можна змінювати порції дози, часові інтервали між ними, тривалість процесу передавання об'єкту кожної порції дози.

Доза пролонгованого опромінення  $D_{prol}$  пов'язана з потужнісп. дози  $P$  таким співвідношенням:  $D_{prol} = P t$ .

Приклад фракціонованого пролонгованого опромінення - передавання дози рослинам, які вирощуються в умовах гамма-поля, де джерело іонізуючого випромінювання вимикається на кілька годин. Пролонгованого безперервного опромінення зазнають організми, які жиї в умовах радіонуклідного забруднення.

Якщо об'єкт зазнає дії іонізуючих випромінювань протягом усього життя, то таке опромінення називають **хронічним**. Потужність дози в разі хронічного опромінення може бути постійною або змінюватися з часом. Дозу, яку отримує організм за хронічного опромінення  $D_{chr}$ , називають **довічно**.

### 3.3. Класифікація потужностей доз опромінення

Традиційно умовно виділяють чотири групи потужностей доз опромінення:

- **надвисокі** (порядку  $10^{13} \dots 10^{11}$  сГр/хв), коли доза передається організму за частки секунди (ефект потужності дози залежить від умісту кисню в середовищі);
- **високі** (порядку  $10^6 \dots 10^2$  сГр/хв), коли доза передається кілька хвилин, тобто гостре опромінення (ефект потужності дози не виявляється);
- **низькі** (порядку  $10^3 \dots 10^{-1}$  сГр/хв), коли доза передається протягом багатьох годин або днів, тобто пролонговане опромінення (ефект потужності дози виявляється найсильніше);
- **дуже низькі** (порядку до  $10^{-1}$  сГр/хв), коли передавання дози триває тижні, місяці й навіть роки, тобто хронічне опромінення (ефект потужності дози не виявляється).

### 3.4. Методи дозиметрії

**Величини, що характеризують іонізуючі випромінювання.** Для проведення екологічного дослідження дії іонізуючого випромінювання на довкілля необхідне розуміння радіаційного поля, тобто простору, в якому реєструється це випромінювання. Специфіку радіаційного поля аналізують методами радіометрії.

До основних радіометричних параметрів, які вивчаються за допомогою лабораторних методів, відносять (Гродзинський, 2000):

- кількість альфа- і бета-частинок випромінених, перенесених або поглинутих опромінюваним об'єктом;
- потік іонізуючих частинок або випромінювання;
- щільність потоку іонізуючих частинок та випромінювання;
- міграція іонізуючих частинок або випромінювання;
- енергія іонізуючого випромінювання.

В результаті взаємодії іонізуючого випромінювання з довкіллям передусім відбуваються структурні зміни або розпад (радіоліз) на рівні молекул і атомів. Ці зміни супроводжуються подальшими молекулярними перетвореннями, що зумовлюють появу нових хімічних речовин і впливають на трансформаційні процеси в екосистемах. Вивчення процесів перетворення екосистем на молекулярному рівні неможливе у польових умовах за допомогою простих й компактних дозиметрів. Воно потребує проведення детальних досліджень у спеціально обладнаних наукових лабораторіях з радіометрії чи радіоспектроскопії.

Відомо чимало різних методів радіометрії, радіоспектроскопії та радіоекологічного контролю складових довкілля, які слід проводити в лабораторних умовах. Серед них особливе місце посідає група радіаційно-хімічних методів (Штреффер, 1972).

### ***Радіаційно-хімічні методи***

Дія іонізуючого випромінювання на хімічні сполуки супроводжується зміною їхнього складу. Кількість молекул, що зазнали відповідних перетворень, залежить від дози їхнього опромінення. На цьому принципі ґрунтується дія хімічних дозиметрів.

Для визначення особливостей радіаційно-хімічних реакцій речовини застосовуються різні методи досліджень, з яких найчастіше використовують спектроскопію, а також методи реєстрації флуоресценції й хемілюмінесценції.

Методи спектроскопії і люмінесценції дають можливість виявлення первинних хімічних форм, що виникають унаслідок поглинання енергії іонізуючого випромінювання, а також домагають вивчати природу походження певних станів молекул і атомів, реєструвати проміжні продукти радіаційно-хімічних перетворень речовин із дуже коротким періодом існування.

Для вивчення швидкоплинних процесів радіолізу застосовують різні методи спектроскопії, зокрема абсорбційну спектроскопію, раманову резонансну спектроскопію, спектроскопію електронного парамагнітного резонансу. Використовуючи ці методи, об'єкт дослідження опромінюють певними нормованими порціями радіації, спостерігаючи за появою нових хімічних форм. Люмінесценція, що супроводжує процес опромінення деяких хімічних речовин радіацією, також дає можливість вивчати явища трансформації екосистем на молекулярному рівні. Збуджені іонізацією електрони випромінюють флуоресцентне або люмінесцентне світло, що дає змогу досліджувати процеси заміни катіон-електронних пар у хімічних розчинах.



Окрім радіаційно-хімічних і радіоспектроскопічних методів, використовують й інші лабораторні методи радіометрії та радіоекологічного контролю, які мають свою специфіку:

- 1) авторадіографічний;
- 2) біологічний;
- 3) іонізаційний;
- 4) напівпровідниковий;
- 5) сцинтиляційний.

**Авторадіографічний метод** полягає в аналізі інформації за допомогою фотографічних зображень, одержаних у результаті дії іонізуючого випромінювання від об'єктів дослідження на різні фоточутливі матеріали. Цей метод використовують для визначення просторової локалізації джерел високої радіоактивності в межах досліджуваного об'єкта. Як фоточутливі матеріали використовують рентгенівську чи фотополімерну плівки, різні фотопластинки і особливі ядерні емульсії.

**Іонізаційний метод** ґрунтується на здатності радіоактивних частинок рухатися з великою швидкістю, спричиняючи іонізацію газів. Іонізаційні дозиметри являють собою герметичні камери, заповнені певним газом, з двома підведеними електродами, до яких під'єднано високу напругу. Як тільки у камері з'являються носії електричного заряду (іони), виникає імпульс струму, силу якого реєструють за допомогою високочутливого гальванометра.

**Напівпровідниковий метод** здійснюється за допомогою приладів, в яких за детектор іонізуючого випромінювання служить напівпровідник, електропровідність якого змінюється під впливом радіації. Більшість напівпровідників реагують лише на нейтронне випромінювання, тому їх переважно використовують у радіометрії нейтронів.

**Сцинтиляційний метод.** Високочутливим щодо реєстрації іонізуючого випромінювання вважається метод, що ґрунтується на використанні сцинтиляторів – органічних чи неорганічних речовин у вигляді хімічних розчинів або кристалів, наприклад йодиду натрію, нафталіну, антрацену. У сцинтиляторах під дією іонізуючого випромінювання виникають світлові спалахи, які реєструються за допомогою фотоелектронного множника. Цей ефект застосовують у сцинтилятивних дозиметрах.

**Біологічний метод.** Деякі види рослин і тварин є надзвичайно чутливими до дії іонізуючого випромінювання і разом з тим вони не реагують на багаторазове повторення їхнього опромінення. Реакцію таких біологічних об'єктів на опромінення використовують як оригінальні радіобіологічні дозиметри.

Крім розглянутих лабораторних радіометричних методів відомі й інші методики радіометрії, які виникли в результаті синтезу науково-методичних підходів у радіаційній фізиці, радіаційній хімії, радіобіології і радіаційній генетиці. Це значно розширює можливості радіоологічних досліджень.

### **3.5. Апаратура для дозиметричних і радіометричних досліджень**

Для якісного та кількісного аналізу складу випромінювання, а також радіонуклідного складу розроблено цілий сектор приладів. Залежно від способу застосування і методу реєстрації даних прилади можна класифікувати як: гамма-спектрометри; бета-спектрометри; альфа-спектрометри; спектрометри вимірювання людини СВЛ; радіометри; дозиметри; радіометри радону.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -спектрометри застосовують для визначення якісного і кількісного аналізу  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -випромінювань радіонуклідів, відповідно, в об'єктах навколишнього середовища, продукції сільського і лісового господарства, продуктах харчування, будівельних матеріалів тощо. Ці аналізатори складаються з відповідного детектора, блока формування електричних сигналів від детектора, багатоканального аналізатора і обчислювального приладу.

Сьогодні на Україні випускається понад двадцять дозиметричних приладів різного функціонального призначення. Однак найбільш використовуються такі дозиметри-радіометри, що відповідають вимогам щодо радіологічного контролю:

- дозиметр ДГР-01Т призначений для вимірювання потужності експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювання;
- дозиметр «Бета» дає змогу вимірювати густину потоку бета-випромінювання і питому активність речовини;
- дозиметр «Прип'ять» застосовується для вимірювання щільності експозиційної дози гамма-випромінювання, густини потоку і питомої активності бета-випромінювання.

Технічні характеристики цих дозиметричних приладів здебільшого збігаються, однак дозиметр «Прип'ять» має найширшу сферу використання під час проведення радіологічного контролю завдяки одночасній можливості вимірювати як гамма- та бета-випромінювання, так і рівень радіоактивного забруднення природного середовища, будівель, продуктів харчування тощо.

Дозиметр «Прип'ять» призначений для індивідуального або колективного використання під час вимірювання: а) еквівалентної експозиційної дози гамма-випромінювання; б) густини потоку бета-випромінювання; в) чистоти земної поверхні, ґрунту, житла, продуктів харчування, одягу тощо; г) рівнів сумарного радіоактивного забруднення довкілля. Дозиметр портативний, вагою 250-300 г, невимогливий в експлуатації, живиться батарейками типу «Корунд» напругою 9В або від електромережі.

#### **Контрольні питання**

1. Наведіть визначення еквівалентної і ефективної дози.
2. Вкажіть співвідношення між одиницями: рентген, грей, бер, зіверт .
3. Які ви знаєте способи передавання дози опромінюваним об'єктам?
4. Назвіть основні методи радіометрії.
5. Для яких цілей призначені  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -спектрометри ?
6. Назвіть основні радіометричні параметри іонізуючих випромінювань, які вивчаються за допомогою лабораторних методів.

## **ТЕМА 4. БІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ**

*4.1. Основні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання*

*4.2. Поняття радіобіологічного ефекту.*

*4.3. Детерміністичні й стохастичні радіобіологічні ефекти*

*4.4. Теорія прямого і непрямого впливу іонізуючого випромінювання*

*4.4.1. Принципи теорії мішені*

*4.4.2. Стохастична (імовірнісна) теорія*

*4.4.3. Теорія непрямой дії іонізуючих випромінювань*

*4.4.4. Теорія ліпідних радіотоксинів (первинних радіотоксинів і ланцюгових реакцій)*

*4.4.5. Структурно-метаболична теорія радіаційного ураження*

### ***4.1. Основні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання***

Основний механізм дії радіації пов'язаний з процесами іонізації атомів і молекул біогенної матерії, зокрема молекул води, що міститься в клітинах. Саме вони і піддаються інтенсивному ураженню. Викликані ураження можуть бути зворотними і незворотними, протікати у формі різної тяжкості променевої хвороби, або обумовлювати летальні наслідки.

Під впливом іонізуючого опромінення атоми і молекули живих клітин іонізуються, в результаті відбуваються складні фізико-хімічні процеси, що впливають на характер подальшої життєдіяльності живої системи.

Існує думка, що іонізація атомів і молекул, яка виникає під дією випромінювання, веде до розривання зв'язків у білкових молекулах, а це призводить до загибелі клітин і ураження всього організму. Часто пояснюють формування біологічних наслідків іонізуючих випромінювань суттєву роль відіграють продукти радіолізу води, якої в складі організму може бути до 70% його маси. Продукти радіолізу води вступають у хімічну взаємодію з молекулами білків та ферментів, руйнуючи їх, у результаті утворюються сполуки, не властиві живому організму. Це призводить до порушення обмінних процесів, пригнічення ферментних і окремих функціональних систем, порушення життєдіяльності всього організму.

Специфічність дії іонізуючого опромінювання полягає в тому, що інтенсивність хімічних реакцій, індукованих вільними радикалами, підвищується, й у них втягуються багато сотень, тисяч молекул, не уражених опроміненням. Ефект дії іонізуючого опромінення зумовлений не кількістю поглинутої енергії об'єктом, який опромінюється, а формою, в якій ця енергія передається. Ніякий інший вид енергії (теплова, електрична), що поглинається біологічним об'єктом у тій самій кількості, не призводить до таких змін, які спричиняє іонізуюче опромінення.

Радіація діє на субмолекулярні, молекулярні, клітинні, тканинні системи, на органи та системи органів (імунну, нервову, травлення, виділення, розмноження тощо) і на організм як єдине ціле, ушкоджуючи всі рівні життя і здійснюючи вплив на всі феномени живого (ріст, розмноження, спадковість, мінливість, резистентність і тривалість життя).

Радіація змінює такі властивості живого як мінливість і спадковість, обумовлює мутації, може бути причиною дрейфу генів, кросинговеру, змінювати напрям доцільного розвитку організму.

Радіація руйнує інтегруючу, регулюючу функції нервової, імунної, гематогенної систем. Вона вносить до організму якби біологічний “безлад”. З особливою силою радіація уражає нервову функцію на рівні рецепторів, де передача нервових імпульсів здійснюється значною мірою на електричних закономірностях взаємодії молекулярних компонент медіаторів, що мають різні заряди.

Якщо доза опромінення висока або багато разів повторюється, то електрони, атоми не встигають рекомбінуватися, репаруватися. Молекулярні зв'язки не відновлюються. Виходить з ладу велика кількість клітин, робота тканин і органів розладнується. Нормальна життєдіяльність організму стає неможливою.

Специфічність дії іонізуючого опромінення полягає в тому, що інтенсивність хімічних реакцій, індукованих вільними радикалами, підвищується, й у них залучаються багато сотень і тисяч молекул, які були не порушені опроміненням.

#### ***Особливості іонізуючого опромінення:***

- органи чуття не реагують на опромінення;
- малі дози опромінення мають кумулятивний ефект, накопичуються;
- іонізуюче опромінення має генетичний ефект, тобто, вражає не лише об'єкт, який опромінюється, але і його потомство;
- різні організми, навіть одного виду, мають різну радіочутливість;
- іонізуюче опромінення піддається радіопротекції і радіосенсибілізації.

Первинні фізичні процеси, що виникають у результаті іонізуючого опромінення біологічних об'єктів, обумовлюють утворення речовин з високою хімічною активністю. Біологічну дію опромінювання головним чином пов'язують з продуктами радіолізу води, до яких відносяться вільні атоми і радикали H, OH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Але іонізуюче випромінювання може здійснювати і пряму дію на біологічні молекули і надмолекулярні структури. Випромінювання викликає різноманітні денатураційні зміни - розрив слабких зв'язків, відрив радикалів, деполімерацію тощо. У результаті біологічного ефекту певне значення можуть мати процеси міграції енергії і утворення стійких метастабільних сполук, що виникають унаслідок тривалого збереження стану збудження в деяких макромолекулярних субстратах.

Дослідження свідчать, що одержана макромолекулами енергія від опромінення внаслідок прямого чи непрямого опромінення, як правило, не реалізується в тому місті, де відбувся акт взаємодії. Вона мігрує специфічними шляхами для даної структури і вражає у найбільш слабкому місці. При цьому в макромолекулах виникають скриті довгоживучі ураження, які можуть бути виявлені з допомогою впливу нерадіаційного фактору.

Людина не відчуває дії радіоактивних випромінювань. В її організмі вони викликають зміни, що залежать від потужності дози: 1 мкбер - перегляд одного хокейного матчу по телебаченню; 0,1 бер - фонове випромінювання за рік; 3,0 бер - при рентгеноскопії зубів; 10,0 бер аварійне опромінення населення

поблизу АЕС; 25,0 бер - аварійне опромінення персоналу АЕС; 30,0 бер - опромінення організму при рентгеноскопії тіла; 75,0 бер - короточасні зміни в складі крові; 100,0 бер - легкий ступінь променевої хвороби; 450-500 бер - важкий ступінь променевої хвороби ( гине 50% опромінених людей); 500 і більше - гинуть 100 % опромінених людей. Тому всі фахівці повинні знати елементарні правила радіаційної гігієни, знати про її підступність, знати як послабити її дію.

Всі органи, тканини по-різному чутливі до дії випромінювань, що іонізують і утворюють **три критичних групи**:

**Перша** - репродуктивні органи - у чоловіків сім'яники, у жінок - яєчники, червоний кістковий мозок.

**Друга** - м'язи, щитовидна залоза, жирова тканина, печінка, нирки, селезінка, легені, кришталик ока.

**Третя** - шкіра, кісткова тканина, руки, передпліччя, стегна, стопи ніг.

Особливо складний механізм впливу іонізуючого випромінювання на спадковість. Виникаючі при цьому порушення можуть передаватися наступним поколінням. У цьому випадку з ростом дози опромінення збільшується не тільки вага, а й і частота поразок (>5бер). Вже в 1934 р. Міжнародна комісія радіаційної охорони встановила толерантну дозу 0,2 рентгена за добу. В наш час цей рівень зменшили до 0,05 бер за рік для населення і 1 бер за рік для працюючих з джерелами іонізуючих випромінювань.

Щоб послабити дію випромінювань, використовують три головних **принципи захисту**:

- захист часом - скорочення часу перебування в небезпечній зоні;
- захист відстанню - збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною;
- захист речовиною - зменшення потужності випромінювання за допомогою товстих прошарків речовин, що послаблюють його дію, наприклад свинцю.

Важливим є використання біологічних радіопротекторів, наприклад сірковмісних амінокислот, препаратів рослинного походження - женьшень, елеутерокок, левзея, лимонник китайський, резерпін (алкалоїд рослинного походження, який вживають для зниження кров'яного тиску), солодка гола, деревій, екстракти мідій, вітаміни.

В умовах підвищеного радіоактивного фону велике значення має повноцінне харчування - наявність у достатній кількості білків, вуглеводів, вітамінів. Білки (м'ясні продукти) містять незамінні амінокислоти (в організмі людини не утворюються і повинні обов'язково надходити з їжею), що активізують роботу печінки, беруть участь у кровотворенні, підвищують імунітет, сприяють повноцінному засвоєнню вітамінів. Білки містять сульфгідрильні групи, які приймають "удар" випромінювань на себе.

#### **4.2. Поняття радіобіологічного ефекту.**

Ефекти опромінення біологічних систем дуже різняться за рівнем реалізації, формою прояву, а також за часом їх здійснення, який варіює від мільйонних часток секунди до багатьох десятків років.

**Радіобіологічний ефект** - відповідь живої клітини або багатоклітинного організму на опромінення. Реалізується в послідовності окремих явищ, які відбуваються на різних рівнях біологічної системи.

У радіобіології розрізняють такі *рівні реалізації радіобіологічних ефектів* у біологічних системах:

- радіаційно-фізичних взаємодій;
- первинних радіаційно-хімічних реакцій;
- радіаційних перетворень біологічно важливих молекул
- індукованих опроміненням порушень молекулярно-біологічних процесів;
- радіобіологічних реакцій клітинних органел;
- клітинних реакцій;
- реакцій клітинних популяцій;
- реакцій органів і системи органів;
- реакцій інтактного організму;
- біоценологічний;
- системи, що еволюціонує.

Розпочинаючися з поглинання об'єктом енергії іонізуючого промінювання (процесом суто фізичним), радіобіологічний ефект завершується кінцевим проявом на відповідному рівні біологічної системи. Тому є підстава стверджувати, що формування будь-якого радіобіологічного ефекту – це кількаетапний процес, і кожному з етапів відповідають певні міри (табл. 4.2.1).

*Таблиця 4.2.1.*

**Основні етапи формування радіобіологічних ефектів і відповідні їх міри**

<i>Етап</i>	<i>Міри ефектів</i>
Поглинання енергії	Поглинута доза
Перехід молекул в іонізовані та збуджені стани	Виходи первинних продуктів дії радіації
Ушкодження біологічно важливих молекул	Виходи продуктів прямої й непрямой дії радіації
Порушення регуляції метаболізму	Параметри зміни характеристик метаболізму як наслідок радіаційного ураження
Порушення регуляції онтогенезу організму	Параметри зміни клітинного гомеостазу, поведінки клітинних популяцій, морфогенезу багатоклітинного організму
Формування генетичних ушкоджень	Виходи цитогенетичних і генетичних ушкоджень

*Часові характеристики* радіобіологічних реакцій на зазначених рівнях дуже різні: від порядку  $10^{-15}$  -  $10^{-4}$  с (радіаційно-хімічні процеси) до десятків років (радіобіологічні відповіді на рівні популяцій клітин, системи органів, тощо).

*Таблиця 4.2.2.*

**Часові характеристики радіобіологічних реакцій**

<i>Типи реакцій</i>	<i>Тривалість перебігу</i>	<i>Головні процеси радіаційного ураження</i>
---------------------	----------------------------	--

Радіаційно-хімічні	$10^{-15}$ .-. $10^{-4}$	Утворення вільних радикалів Первинний розмін енергії іонізуючих квантів або частинок
Фізико-хімічні	Частки секунди	Дифузія вільних радикалів, іонів та кисню
Клітинні	Хвилини—години	Репарація клітин Зміни метаболізму Перебудова мембранної системи Поділ клітини
Соматичні	Дні—роки	Порушення морфогенезу Канцерогенез Зміна тривалості онтогенезу
Генетичні	Багато десятиліть	Формування мутації
Еволюційні	Багато десятиліть	Міграція генних мутацій Сукцесійні процеси

У міру ускладнення біологічної системи формування радіобіологічних ефектів дедалі більше зумовлюється не прямими радіаційними ушкодженнями молекулярних структур клітини, а спричиненими цим вторинними «нашаруваннями» метаболічного, цитогенетичного і фізіологічного характеру

### ***Первинні й вторинні процеси у формуванні радіаційного ураження клітин і багатоклітинного організму***

У радіаційно-хімічних реакціях до **прямих ефектів опромінення** належать ушкодження молекул під час безпосереднього передавання їм енергії фотона або зарядженої частинки.

**До опосередкованих ефектів** належать ушкодження молекул внаслідок дії на них активних хімічних форм, що виникли в результаті прямих радіаційно-хімічних перетворень.

Під **первинними процесами** розуміють ушкодження біологічно важливих молекул унаслідок прямого передавання їм енергії іонізуючі випромінювання чи в результаті атакуювання рухомими хімічними і тивними продуктами, що виникають під час опромінення складу хімічних сумішей або розчинів. Отже, первинні процеси охоплюють пряму й непряму дію іонізуючого випромінювання, тобто біофізичні й радіаційно-хімічні процеси.

З появою змінених унаслідок опромінення біологічно важливих молекул розпочинаються **вторинні процеси**. Ці процеси охоплюють низку клітинних явищ, в яких беруть участь ушкодження молекули, що спричинює формування летального ураження клітини. До таких явищ належать реплікація ДНК, якщо йдеться про радіаційне ушкодження молекули. В разі реплікації відбувається дублювання ушкодження ДНК з появою двониткового розриву подвійної спіралі. За подальшого поділу клітини з таким двонитковим розривом ДНК може настати проліферативна загибель клітин унаслідок формування хромосомної аберації. Якщо ж інактивації зазнала молекула білка, котра до того ж має унікальний для клітини характер, та розвиток вторинних процесів відображує дефіцит певної функції здійснення якої потребує наявності ушкодженої опроміненням молекули білка.

Якщо ж первинний процес завершився порушенням молекулярної структури, яка забезпечує перетворення сигналів, що визначають функціональну орієнтованість клітинних процесів, то спостерігається. У таких активних реакціях реалізується стратегія виживання клітини або багатоклітинного організму.

### 4.3. Детерміністичні й стохастичні радіобіологічні ефекти

За характером дозових залежностей розрізняють радіобіологічні реакції двох типів:

- 1) від значення дози залежить інтенсивність їх прояву;
- 2) від значення дози залежить частота їх прояву.

Ефекти першого типу називають **детерміністичними**. До них належать, наприклад: променева хвороба, яка проявляється комплексом патологічних змін - *радіаційним синдромом*; численні прояви радіаційного ураження - гальмування процесів росту, уповільнення просування клітин клітинним циклом, індукція безплідності, розлади імунної системи тощо.

Детерміністичні радіобіологічні ефекти не мають рис, які притаманні ймовірнісному процесові: опромінення в певній дозі провокує радіаційне ураження відповідного рівня.

За дуже малих доз опромінення детерміністичні ефекти можуть не проявлятися, що свідчить про існування *дозового порога* — межі дозового навантаження, лише в разі перевищення якого проявлятиметься ефект. Інтенсивність прояву радіобіологічного детерміністичного ефекту є функцією дози. Значна частина детерміністичних ефектів є наслідком багато-етапних процесів розвитку радіаційного ураження.

Ефекти другого типу називають **стохастичними (ймовірнісними)**. До них належать такі реакції біологічної системи на опромінення, прояв яких характеризується ймовірнісною величиною: після опромінення радіобіологічний ефект може проявитись, а може й не проявитись. Інтенсивність прояву стохастичного ефекту не залежить від дози (від неї залежить частота його прояву).

Стохастичними ефектами є: втрата проліферативної активності клітиною як наслідок цитогенетичних ушкоджень, поява мутацій, трансформація клітин, що супроводжується канцерогенезом.

Утрата проліферативної активності клітини, що проявляється в припиненні поділів, є наслідком ймовірнісних за своєю природою цитогенетичних ушкоджень.

Формування точкових мутацій того чи іншого гена спричиняє відповідними структурними перебудовами в ділянках генів, відкладення енергії випромінювання в яких є ймовірнісним процесом

Оскільки трансформацією клітин розпочинається пухлинне переродження тканини, то формування злоякісних пухлин, індукованих опроміненням, також є стохастичним ефектом.

До стохастичних ефектів належать і появи хромосомних аберацій.



Для прояву стохастичних ефектів іноді потрібні досить тривалі проміжки часу після опромінення: первинні ушкодження ДНК молекул реалізуватись у віддалених нащадків опромінених у кількох їх поколіннях.

**Генетичні ефекти**, спадкові зміни - стохастичні ефекти опромінення - спостерігаються як у спеціалізованих клітинах, що зазнали диференціації й здебільшого далі не діляться, так і в клітинах твірних тканин (меристемах), у репродуктивних клітинах.

Відповідно розрізняються *мутації соматичних клітин* і *мутації гамет* (це стосується лише багатоклітинних організмів, яким властива наявність соматичних і генеративних клітин).

Мутації гамет можуть проявитись в появі *мутантів* – організмів зі зміненими спадковими ознаками. Для підтвердження спадкової природи морфологічних або фізіологічних змін застосовують гібридологічний аналіз.

#### **4.4. Теорія прямого і непрямого впливу іонізуючого випромінювання**

Вплив іонізуючих випромінювань на клітини та організми визначається енергією випромінювань, що передається атомам і молекулам, з якими вони взаємодіють. Це лише перший фізичний етап дії іонізуючого випромінювання, в результаті якого відбувається збудження та іонізація молекул. На наступному етапі збуджені та іонізовані молекули вступають у ряд перетворень, що можуть завершуватись утворенням нових хімічних сполук. Це так званий хімічний етап променевого ураження клітини.

В основі первинних радіаційно-хімічних перетворень молекул можуть бути два механізми, зумовлені прямим та непрямим впливом радіації.

Розглянемо цей вплив радіації за Д.М. Гродзинським.

**Прямим** називають такий вплив випромінювання, в результаті якого потрапляння іонізуючої частки або кванта іонізуючого випромінювання спричиняє пошкодження молекули, якій безпосередньо було передано енергію частки чи кванта.

**Непрямим** впливом називають такий вплив, в результаті якого пошкодження молекул відбувається внаслідок впливу продуктів радіаційно-хімічних перетворень інших молекул, а не внаслідок енергії випромінювання, поглинутої молекулами.

##### **4.4.1. Принципи теорії мішені**

Ця теорія пояснює наявність у клітині життєво важливого центра (гена або ансамблю генів) - мішені, влучення в яку однієї або декількох високоенергетичних часток атомної радіації досить для руйнування й загибелі клітини.

Теорія мішені ґрунтується на трьох принципах: влучання, мішені, посилювача.

**Принцип влучання** - характеризує особливість діючого агента (випромінювання). Ця особливість полягає в дискретності поглинання енергії випромінювання, тобто поглинання порцій енергії при випадковому влучанні в мішень. Таке передавання енергії здійснюється за механізмами пружного

співударяння (фотоелектричного ефекту) або непружного розсіяння (ефекту Комптона).

**Принцип мішені** - враховує особливість об'єкта, що опромінюється (клітини), тобто розбіжності в її реакції на одне і те саме влучення. Інактивація клітини відбувається лише за умови влучання в певні її ультраструктури. Під унікальністю структури розуміють одиничність в клітині й жодна інша структура не здатна компенсувати її функцію, крім того, вона не відтворюється в ході метаболічних процесів.

**Принцип посилювача** – інактивація мішені досягається в акті передавання енергії випромінювання речовині, внаслідок чого молекули зазнають іонізації і збудження.

«Мінуси» теорії - не пояснює залежність радіобіологічного ефекту від температури й наявності в опромінюваному середовищі кисню.

#### **4.4.2. Стохастична (імовірнісна) теорія**

Ця теорія, так само як і теорія мішені, враховує імовірнісний характер влучання випромінювання в чутливий об'єм клітини, але на відміну від попередньої вона ще враховує й стан клітини як біологічного об'єкта, лабільної динамічної системи.

Клітина як лабільна динамічна система постійно перебуває в стадії переходу з одного стану в інший шляхом клітинного поділу - мітозу.

Радіочутливість клітини в різні стадії мітозу неоднакова. Найбільшу чутливість до іонізуючого випромінювання має клітина в стадії *профази*, тобто на початку поділу. Опромінення в період інтерфази приводить до втрати здатності приступати до нового поділу. У клітинах, що вже почалися ділитися (профаза), опромінення гальмує його завершення. У цих випадках легко порушується структура хроматинової речовини, у результаті чого клітина може загинути.

На підставі різноманітності радіочутливості клітин французькі вчені Бергоньє й Трибондо (1903 р.) сформулювали *правило*: чутливість клітин до опромінення прямо пропорційна інтенсивності клітинного поділу й обернено пропорційна ступені їх диференціювання (виключення становлять високодиференційовані, але такі що не діляться нервові клітини, і лімфоцити крові).

Отже, найбільш ушкоджені клітини тих тканин, які володіють високою мітотичною активністю. До них належать клітини органів кровотворення (червоний кістковий мозок, селезінка, лімфовузли), статеві залози, епітелій кишечника й шлунка, а також клітини швидкоростучих пухлин. Тому не випадково при розвитку гострої променевої хвороби в першу чергу спостерігаються порушення кровотворення, ураження шлунково-кишкового тракту (криваві поноси), статевих клітин і т.д.

Найбільш радіочутливим компонентом клітини є *ядро*.

"Плюси" теорії:

- враховує різноманіття ушкоджень, викликуваних іонізуючим випромінюванням;

- враховує роль репараційних процесів.

Стохастична теорія як би більш біологічна в порівнянні з теорією мішені.

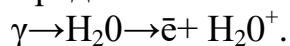
"Мінуси" теорії: не змогла пояснити деякі ефекти, і зокрема ефект розведення.

#### 4.4.3. Теорія непрямой дії іонізуючих випромінювань

При непрямої дії іонізуючих випромінювань найбільш виражений процес радіолізу (радіаційного руйнування) води, тому що вода становить основу найважливіших структур клітини (80-90%). Саме у воді розчинені білки, нуклеїнові кислоти, ферменти, гормони й інші життєво важливі речовини, що є основними компонентами клітини, яким легко може бути передана енергія, спочатку поглинена водою.

Процес радіолізу води відбувається в три фази: у фізичній - триває  $10^{-13}$ - $10^{-16}$  с; у фазі первинних фізико-хімічних перетворень -  $10^{-6}$ - $10^{-9}$  с; у фазі хімічних реакцій -  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  с. Фізична фаза - один з моментів прямої дії іонізуючого випромінювання на молекулярні й біологічні структури клітини.

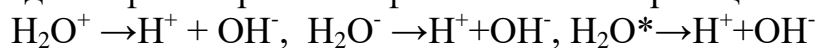
У фізичній фазу відбувається взаємодія іонізуючого випромінювання з молекулою води, у результаті чого вибивається електрон із зовнішньої орбіти атома й утворюється позитивно заряджений іон води:



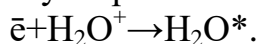
«Вирваний» електрон приєднується до нейтральної молекули води, утворюючи негативний іон води:  $\bar{e} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$ .

При ефекті збудження утвориться нейтрально заряджена молекула води з надлишком енергії, привнесеної іонізуючим випромінюванням:  $\gamma \rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+$ .

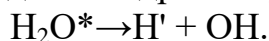
Фізико-хімічні властивості іонізованих і збуджених молекул води будуть відрізнятися від молекул води електрично нейтральних. Тривалість існування таких молекул дуже коротка; вони розпадаються (дисоціюють), утворюючи високореактивні вільні радикали водню й гідроксилу ( $\text{H}^+$  і  $\text{OH}^+$ ); настає друга фаза радіолізу води — фаза первинних фізико-хімічних реакцій:



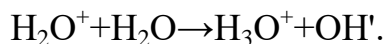
Гідроксильні радикали ( $\text{OH}^+$ ) – сильний окислювач, а радикал водню ( $\text{H}^+$ )-відновник. Утворення вільних радикалів може йти й іншим шляхом. Вирваний з молекули води під дією випромінювання електрон може приєднатися до позитивно зарядженого іона води з утворенням збудженої молекули:



Надлишкова енергія цієї молекули витрачається на її розщеплення з утворенням вільних радикалів водню й гідроксилу:



Іонізована молекула води ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ) може реагувати з іншою нейтральною молекулою води ( $\text{H}_2\text{O}$ ), у результаті чого утвориться високореактивний радикал гідроксилу ( $\text{OH}^+$ ):



На цьому закінчується фізико-хімічна фаза і розвивається третя фаза дії ІВ - фаза хімічних реакцій.

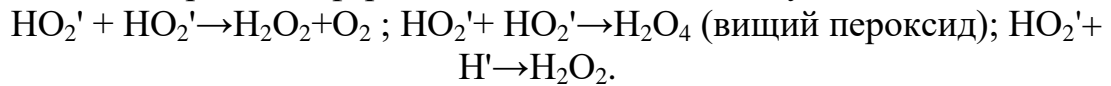
Маючи дуже високу хімічну активність за рахунок наявності неспареного електрона, вільні радикали взаємодіють один з одним або з розчиненими у воді речовинами. Реакції можуть йти наступними шляхами:

- рекомбінація, відновлення води,  $\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ;

- утворення молекул водню,  $H + H' \rightarrow H_2$ ;
- утворення молекул води й виділення кисню, що є сильним окислювачем,  $OH' + OH' \rightarrow H_2O + O$ ;
- утворення пероксиду водню,  $OH' + OH' \rightarrow H_2O_2$ .

При наявності в середовищі розчиненого кисню  $O_2$  можлива реакція утворення гідропероксидів:  $H' + O_2 \rightarrow HO_2'$  (гідропероксидний радикал). Ця реакція вказує на роль кисню в ушкоджуючому ефекті іонізуючого випромінювання.

Гідропероксиди можуть взаємодіяти між собою, утворюючи пероксиди водню й вищі пероксиди, які мають високу токсичність, але вони дуже швидко розкладаються в організмі ферментом каталазою на воду й кисень:



Поява вільних радикалів і їхня взаємодія, становлять етап первинних хімічних реакцій води й розчинених у ній речовин, а у випадках опромінення тварин і рослин - і біологічних молекул.

Взаємодія вільних радикалів з органічними й неорганічними речовинами йде по типу окислювально-відновних реакцій і становить ефект непрямой дії.

Величина прямої й непрямой дії в первинних радіобіологічних ефектах різних систем неоднакова. В абсолютно чистих сухих речовинах буде переважати пряма, а в слабо-розчинених - вплив непрямой дії радіації. У тварин, за даними А.М. Кузина, приблизно 45% поглиненої енергії випромінювання діє безпосередньо на молекулярні структури - пряма дія, а інші 55% енергії викликають непрямую дію.

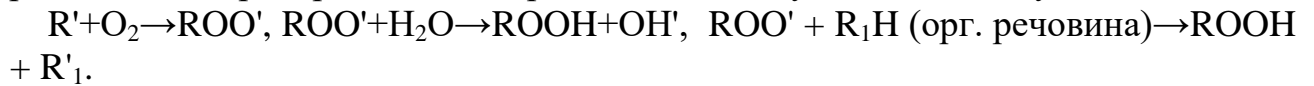
Про відмінність прямої й непрямой дії радіації на біологічні об'єкти й величину їхнього впливу на розвиток променевого ураження, на думку авторів теорії, можна судити по двох феноменах - ефекту розведення й кисневому ефекту.

**Ефект розведення** - стан, при якому абсолютне число ушкоджених молекул речовин у слабкому розчині не залежить від його концентрації й залишається для даної експозиційної дози постійним, тому що в цих конкретних умовах у розчині утвориться постійна кількість активованих радикалів.

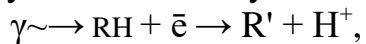
**Кисневий ефект.** З підвищенням концентрації кисню в навколишньому середовищі й об'єкті опромінення підсилюється ефект променевого ураження, і навпаки, при зниженні концентрації кисню спостерігається зменшення ступеня променевого ураження. Виразність кисневого ефекту в різних видів випромінювань, неоднакова й залежить від їхньої лінійної втрати енергії (ЛВК); з підвищенням її ефект зменшується. При дії випромінювань із малою щільністю ЛВЕ (гама- і рентгенівські промені) спостерігається найбільший ефект, а при впливі випромінювань із високими ЛВЕ (альфа-частинки) він повністю відсутній. Кисневий ефект проявляється у всіх радіобіологічних реакціях ослаблення або посилення біохімічних змін, мутацій у всіх біологічних об'єктів (рослин і тварин) і на всіх рівнях їхньої організації - молекулярному, субклітинному, клітинному, тканевому.

У присутності кисню відбувається значне посилення непрямой дії продуктів радіолізу води й низькомолекулярних органічних сполук. Вільні радикали,

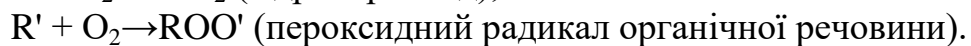
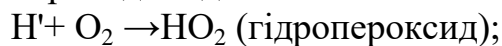
взаємодіючи з киснем, утворюють гідропероксиди, пероксиди й вищі пероксиди, які проявляють токсичну дію на організм. Стабілізація радикалів OH' у присутності кисню збільшує ймовірність утворення активних вільних радикалів органічних речовин, які присутні в середовищі що опромінюється:  $RH + OH' \rightarrow R' + H_2O$ . Утворені вільні радикали органічних речовин у присутності кисню будуть реагувати з ним, утворюючи пероксидний радикал ( $ROO \cdot$ ), що, у свою чергу, реагуючи з будь-якою органічною речовиною або молекулами води, ініціює ланцюгову реакцію утворення активних вільних радикалів і гідропероксидів, що роблять токсичну дію на клітину:



Наявність кисню в опроміненному середовищі підсилює також пряму дію радіації. При влученні  $\gamma$ -кванта в молекулу органічної речовини, так само як і у випадку з водою, утворюються активні радикали в результаті іонізації й збудження молекул:



Ці радикали, взаємодіючи з киснем, утворюють гідропероксиди й пероксиди, які приводять до глибокої зміни молекул:



Крім того, ліпіди біомембран під дією іонізуючого випромінювання в присутності кисню утворюють пероксиди й продукти їхнього розпаду (малоновий альдегід і ін.). Таким чином, у кисневому середовищі утворюється більше токсичних речовин, їхня концентрація вища, що і пояснює кисневий ефект.

#### ***4.4.4. Теорія ліпідних радіотоксинів (первинних радіотоксинів і ланцюгових реакцій)***

У перші години після опромінення в тканинах тварин утворюються речовини, які при наступному введенні їх інтактною твариною викликають гемоліз. Ідентифікація речовин установила їхню ліпідну природу, що дало підставу називати їх ліпідними радіотоксинами (ЛРТ).

Ліпідні радіотоксини являють собою лабільний комплекс продуктів окислювання ненасичених кислот, гідропероксидів, альдегідів, епоксидів і кетонів.

Вони викликають: гемоліз; гальмування клітинного розподілу; порушення кровотворення; ушкодження хромосомного апарата й ін.

Для здійснення ланцюгових реакцій необхідні радикали з великою енергією, достатньою для утворення наступних радикалів. У випадках, коли на один радикал утворюється два або три, виникає самоприскорюваний процес, що називають реакцією з розгалуженими ланцюгами. В організмі тварин у нормальних умовах низький рівень окислювання біоліпідів обумовлюють антиокислювачі - природні антиоксиданти. При променевому впливі така рівновага порушується внаслідок появи великої кількості радикалів. Автокаталітичний режим ланцюгових реакцій виникає у випадках, коли вміст природних антиокислювачів зменшується на 10-15% (О.І. Журавльов). У міру

зменшення числа реакційноздатних молекул у субстраті реакція загасає; при цьому знижується кількість радикалів і пероксидів і збільшується вихід кінцевих продуктів.

На думку авторів гіпотези, при опроміненні спочатку уражуються ліпіди клітинних мембран, що приводить до порушення хімізму клітини, а ліпідні радіотоксини, що потім утворюються, викликають окислювання молекул інших органічних сполук живої тканини.

"Мінуси" теорії - нагромадження ліпідних радіотоксинів кількісно не пов'язане із ЛВЕ, а ЛВЕ в основному визначаються ВВЕ іонізуючого випромінювання.

#### ***4.4.5. Структурно-метаболична теорія радіаційного ураження***

Російський радіобіолог А.М. Кузин створив структурно-метаболичну теорію. В основу цієї теорії покладено принцип багатофакторності як головної причини формування радіобіологічних ефектів.

Внаслідок ушкодження масових структур порушуються метаболичні процеси, що спричиняє появу аномальних метаболітів, низькомолекулярних сполук, які виявляють біологічну активність. Такі аномальні метаболіти боло названо радіотоксинами. Таким чином, у структурно-метаболичній теорії до радіаційного ураження ядерних макромолекул як фактора прямої дії відповідно до теорії мішені додаються порушення цитоплазматичних структур і зміна нормального їх функціонування.

Під дією радіації вміст токсичних метаболітів збільшується й з'являються нові токсичні з'єднання. Первинні радіотоксини утворюють велику кількість вторинних радіотоксинів, які відіграють істотну роль у патогенезі.

Імовірнісний характер радіобіологічних ефектів структурно-метаболична теорія пов'язує не з імовірністю влучання в певні ультраструктури клітини, а з імовірністю різних нетипових для норми взаємодій у деформованій мережі метаболичних процесів опроміненої клітини.

Променеve ураження клітини є складним інтегрованим процесом, який має низку етапів. Початковий етап — це первинні ефекти взаємодії випромінювань з окремими молекулами речовин що входять до складу ультраструктур клітини. Подальші етапи охоплюють радіаційно-хімічні зміни структури молекул, а також індуквані цими змінами порушення окремих метаболичних і регуляторній функцій і, нарешті, формування кінцевого радіобіологічного ефекту. На першому етапі реалізуються принципи теорії мішені, на наступних — принципи структурно-метаболичної теорії.

#### ***Контрольні питання***

1. В чому полягають фундаментальні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання?
2. Які типи дій випромінювань на живі організми клітини Ви знаєте?
3. Охарактеризуйте загальну схему впливу іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти.
4. В чому полягає суть теорії прямої дії радіації?
5. Охарактеризуйте теорію непрямой дії іонізуючих випромінювань.